



UNIVERSIDADE DA CORUÑA  
DEPARTAMENTO DE ENERGÍA Y PROPULSIÓN MARINA

TESIS DOCTORAL

COMPENSACIÓN DEL MAGNETISMO ACCIDENTAL DEL  
DESVÍO DE ESCORA MEDIANTE UNA TERCERA ESFERA;  
SU INFLUENCIA SOBRE EL DESVÍO CUADRANGULAR

PEDRO GEA VÁZQUEZ





**UNIVERSIDADE DA CORUÑA**

**DEPARTAMENTO DE ENERGÍA Y PROPULSIÓN MARINA**

**TESIS DOCTORAL**

**COMPENSACIÓN DEL MAGNETISMO ACCIDENTAL DEL DESVÍO  
DE ESCORA MEDIANTE UNA TERCERA ESFERA; SU  
INFLUENCIA SOBRE EL DESVÍO CUADRANTAL**

**Pedro Gea Vázquez**



**UNIVERSIDADE DA CORUÑA**

**DEPARTAMENTO DE ENERGÍA Y PROPULSIÓN MARINA**

**TESIS DOCTORAL**

**COMPENSACIÓN DEL MAGNETISMO ACCIDENTAL DEL DESVÍO  
DE ESCORA MEDIANTE UNA TERCERA ESFERA; SU  
INFLUENCIA SOBRE EL DESVÍO CUADRANTAL**

**Pedro Gea Vázquez**

**Director: José Manuel García Fernández**

**Enero, 2003**

*A la memoria de Enrique González Pino*



## ÍNDICE

<b>CAPITULO I: PLANTEAMIENTO GENERAL DE LA INVESTIGACIÓN</b>	<b>1</b>
1.- LA INVESTIGACION DE LOS DESVIOS DE LA AGUJA NÁUTICA EN EL CONTEXTO GLOBAL DE LA NAVEGACIÓN MARÍTIMA.3	3
1.1.- INTRODUCCION GENERAL.	5
1.2.- CARACTERISTICAS DE LA INVESTIGACION ESPECIFICA	6
1.3.-LA INVESTIGACION DE LA PROBLEMÁTICA NÁUTICA EN LA UNIVERSIDAD	8
2.- MARCO REFERENCIAL DE LA TESIS.	9
2.1.- ELECCION DEL TEMA DE LA INVESTIGACION.	11
2.2.- ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO E HIPÓTESIS DE PARTIDA	13
3.- METODOLOGÍA	15
3.1.- IMPLANTACION DE UNA METODOLOGIA OPERATIVA	17
3.2.- DESCRIPCION PORMENORIZADA	20
4.- PROCESO DE ELABORACION Y CONTENIDO	23
4.1.- PREPARACION, RECOPIACION DEL MATERIAL Y ANALISIS INDIVIDUALIZADO	25
4.2.- ELABORACION PORMENORIZADA	26
4.3.- CONTENIDO GLOBAL Y DISCRETIZADO	29
<b>CAPÍTULO II: MARCO REFERENCIAL DEL ÁREA DE INFLUENCIA</b>	<b>31</b>
1.- INTRODUCCIÓN AL MAGNETISMO. CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE	33
1.1.-ANTECEDENTES HISTÓRICOS DE LA COMPENSACIÓN	35

1.2.- MAGNETISMO	44
1.2.1.- IMANES. DIPOLOS MAGNÉTICOS	44
1.2.2.- LA LEY DE COULOMB APLICADA A LOS POLOS MAGNÉTICOS	45
1.2.3.- CAMPO MAGNÉTICO. FLUJO MAGNÉTICO	47
1.2.4.- EXCITACIÓN MAGNÉTICA	50
1.2.5.- FUERZAS EJERCIDAS POR LOS CAMPOS MAGNÉTICOS SOBRE DIPOLOS	51
1.2.6.- MOMENTO DIRECTOR DE UNA AGUJA MAGNÉTICA	52
1.2.7.- ACCIÓN DE LOS POLOS DE UN IMÁN CORRECTOR SOBRE LOS POLOS DE LA AGUJA NÁUTICA	57
1.3.- EL CAMPO MAGNETICO TERRESTRE	60
1.3.1.- MODELO APLICADO DEL CAMPO MAGNETICO TERRESTRE	64
1.3.1.1.- VARIACIONES DEL CAMPO MAGNETICO TERRESTRE	66
2.- MAGNETISMO DEL BUQUE	69
2.1.- CLASIFICACION DE LOS HIERROS A BORDO	71
2.2.- CAMPOS MAGNETICOS QUE ACTUAN SOBRE LA AGUJA	80
2.3.1.- SIGNIFICACION Y SIGNO DEL MAGNETISMO PERMENENTE	82
2.4.- MAGNETISMO INDUCIDO	83
2.4.1.- SIGNIFICACION Y SIGNO DEL MAGNETISMO INDUCIDO.	84
3.- FUERZAS QUE ACTÚAN SOBRE LA AGUJA	87
3.1.- FUERZA QUE SOLICITA LA AGUJA AL NORTE MAGNÉTICO	89
3.2.- FUERZA QUE SOLICITA LA AGUJA AL ESTE MAGNÉTICO	92
3.3.- FUERZA DIRECTRIZ MEDIA	93
3.2.1.- CALCULO DEL COEF. $\lambda$ EN SUS DOS EXPRESIONES: $\lambda_1$ y $\lambda_2$	94
3.4.- EXPRESIÓN DE LA ECUACIÓN EXACTA DEL DESVÍO.	96

3.4.1.- COMPONENTES DE LA ECUACIÓN APROXIMADA DEL DESVÍO	97
3.4.2.- CALCULO DE LOS COEFICIENTES APROXIMADOS	99
4.- DESVÍOS ORIGINADOS EN LA AGUJA	101
4.1.- ANÁLISIS PORMENORIZADO DE LOS DESVÍOS PRODUCIDOS POR LAS DISTINTAS CLASES DE HIERROS DEL BUQUE	103
4.1.1.- DESVÍOS DE LOS IMANES P, Q y R	103
4.1.2.- DESVÍOS PRODUCIDOS POR LAS VARILLAS “a”, “e”	106
4.1.2.1.- ACCIÓN COMBINADA DE LAS VARILLAS “a” y “e”	109
4.1.3.- DESVÍOS PRODUCIDOS POR LAS VARILLAS “c”, “g” y “k”	110
5.- COMPENSACIÓN DE LOS IMANES Y VARILLAS INTERVINIENTES EN EL DESVÍO.	115
5.1.- CORRECTORES EMPLEADOS EN LA COMPENSACIÓN	117
5.1.1.- CORRECTORES DE HIERRO DURO	117
5.1.2.- CORRECTORES DE HIERRO DULCE	118
5.3.- INSTALACIÓN DE LOS CORRECTORES	120
5.3.1.- IMANES LONGITUDINALES Y TRANSVERSALES	120
5.3.2.- IMANES VERTICALES	121
5.2.3.- INSTALACIÓN DE LA BARRA FLINDERS	122
5.2.4.- INSTALACIÓN DE LAS ESFERAS.	123
5.3.- ORDEN DE COLOCACIÓN DE LOS CORRECTORES	124
5.4.- COMPENSACIÓN DE LA AGUJA CON EL BUQUE ADRIZADO	125
5.4.1.- ANULACIÓN DEL COEFICIENTE A.	126
5.4.2.- ANULACIÓN DEL COEFICIENTE B	126
5.4.3.- ANULACIÓN DEL COEFICIENTE C	128



5.4.4.- ANULACIÓN DE LOS COEFICIENTES D Y E	129
<b>CAPÍTULO III.- INCIDENCIA DE LAS NUEVAS FUERZAS QUE ORIGINAN EL DESVÍO DE ESCORA Y SU ANULACIÓN</b>	131
1.- EL DESVÍO DE ESCORA	133
1.1.- DESVÍO DE ESCORA.	135
1.1.1.- FUERZAS QUE ORIGINAN EL DESVÍO DE ESCORA; ESTUDIO PORMENORIZADO PARA LOS IMANES PERMANENTES P, Q y R.	136
1.1.2.- ESTUDIO PORMENORIZADO DE LAS FUERZAS QUE ORIGINAN EL DESVÍO DE ESCORA DEBIDO A LAS VARILLAS “a”, “g”, “e”, “c” y “k”.	137
1.1.3.- FUERZAS DIRECTRICES Y PERTURBADORAS GENERADAS POR LA ESCORA DEL BARCO	141
1.2.- ECUACIÓN EXACTA DEL DESVÍO DE ESCORA CON EL BUQUE ESCORADO	143
1.2.1.- ECUACIÓN APROXIMADA DEL DESVÍO DE ESCORA CON EL BUQUE ESCORADO.	146
1.2.2.- ECUACIÓN APROXIMADA DEL DESVÍO DE ESCORA.	147
2.- COMPENSACIÓN DEL DESVÍO DE ESCORA	149
2.1.- COEFICIENTE J.	151
2.1.1.- EXPRESIÓN DE LA FUERZA VERTICAL MEDIA; FACTORES “ $\mu$ ” Y “ $\mu_2$ ”.	152
2.2.- COMPENSACIÓN TEÓRICA DEL DESVÍO DE ESCORA.	153
2.2.1.- COMPENSACIÓN TRADICIONAL DEL DESVÍO DE ESCORA.	155

2.2.2.- COMPENSACIÓN APROXIMADA DEL DESVÍO DE ESCORA A BORDO.	157
---------------------------------------------------------------	-----

<b>CAPÍTULO IV.- CORRECCIÓN DEFINITIVA DEL DESVÍO DE ESCORA. CONTRASTE PRÁCTICO EN LABORATORIO</b>	159
----------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

1.- CORRECCIÓN DEFINITIVA DEL DESVÍO DE ESCORA MEDIANTE LA INTRODUCCIÓN DE UNA TERCERA ESFERA	161
-----------------------------------------------------------------------------------------------	-----

1.1.-PLANTEAMIENTO	163
--------------------	-----

2.-COMPROBACIÓN EN LABORATORIO	169
--------------------------------	-----

2.1.- ESTABLECIMIENTO	171
-----------------------	-----

2.2.- ELEMENTOS DEL LABORATORIO	172
---------------------------------	-----

2.2.1.- EL DESVIOSCOPIO “COOKE BEALL”	172
---------------------------------------	-----

2.2.1.1.-CÓMO CORREGIR EL DESVÍO DEL MODELO.	175
----------------------------------------------	-----

2.2.2.- AGUJA MAGNÉTICA OSCILANTE.	178
------------------------------------	-----

2.2.3.- FLUXGATE.	180
-------------------	-----

3. PLANTEAMIENTO DE LAS EXPERIENCIAS.	183
---------------------------------------	-----

3.1 ELEMENTOS EMPLEDOS.	185
-------------------------	-----

3.2 METODOLOGÍA DE LAS EXPERIENCIAS.	186
--------------------------------------	-----

4.- EXPERIENCIAS	187
------------------	-----

<b>CAPITULO V.- CONCLUSIONES Y DIRECTRICES DE LAS FUTURAS INVESTIGACIONES</b>	261
-------------------------------------------------------------------------------	-----

1.- CONCLUSIONES	263
------------------	-----

1.1.- CONCLUSIONES INICIALES	265
------------------------------	-----

1.1.1.- CONSIDERACIONES GENERALES	265
-----------------------------------	-----

1.2.- CONCLUSIONES FINALES	269
----------------------------	-----

2.– DIRECTRICES DE LAS FUTURAS INVESTIGACIONES	271
2.1.– LINEA DE CONTINUIDAD FORMALMENTE ESTABLECIDA	273
ABREVIATURAS	275
ÍNDICE DE FIGURAS	279
BIBLIOGRAFÍA	285
ANEXOS	295



# **CAPITULO I: PLANTEAMIENTO GENERAL DE LA INVESTIGACIÓN.**



**1.- LA INVESTIGACION DE LOS DESVIOS DE LA AGUJA  
NÁUTICA EN EL CONTEXTO GLOBAL DE LA NAVEGACIÓN  
MARÍTIMA.**





## **1.1.- INTRODUCCION GENERAL.**

Los trabajos de análisis o de investigación suelen versar sobre un tema particular y se caracterizan por utilizar documentación de alto rigor científico inédito o ya editados (estadísticas, textos,...). Por consiguiente, siempre son fiables. Estos tipos de trabajos son los únicos legalmente admitidos para configurar una Tesis Doctoral.

Puede establecerse una tipología básica de trabajos de investigación:

- **MONOGRAFIAS:** Estudio elaborado de un tema, pero limitado en el espacio y en el tiempo.
- **EDICION DE TEXTO:** Confección de un texto, debidamente anotado y precedido de un estudio.
- **COLECCION DOCUMENTAL:** Recopilación de documentos acompañados de un estudio.
- **RECENSION CRITICA:** Resumen de un trabajo científico con valoración del mismo.

Los trabajos de síntesis se caracterizan por dar una visión de conjunto del tema, recurriendo a una bibliografía seleccionada, pero no a materiales de primera mano. Según la finalidad que se proponen, existen los siguientes tipos básicos de trabajos de síntesis:

- **DIVULGACION:** El objetivo primordial es dar a conocer un tema a no especialistas. Exige simplificar y generalizar y exponerlo con estilo sencillo y atractivo.
- **DIDACTICO:** Exponer un tema de manera que pueda ser estudiado. La exposición no debe ser prolija ni estar cargada de detalles.
- **CIENTIFICO:** Desarrollar un tema con la mayor precisión y detalle.

Para desarrollar este primer apartado de matiz introductorio sobre la Investigación en el contexto general, se han seguido las pautas marcadas por el Catedrático David Romano, en su publicación "Elementos y técnica del trabajo científico" y el archivo documental existente en el Departamento de Ciencias de la Navegación y de la Tierra de la Universidad de A Coruña.

## **1.2.- CARACTERISTICAS DE LA INVESTIGACION ESPECIFICA.**

La Investigación siempre ha estado ligada a la Astronomía Náutica y a la Navegación, estableciendo etapas significativas a lo largo de la historia de la humanidad. La importancia social de lo escrito en el firmamento fue posibilitando avances y, en cierta medida, ha regulado la vida del hombre hasta el momento actual en que las constelaciones de satélites artificiales configuran actuaciones de alto contenido tecnológico.

En un principio la posición de las estrellas tenía una significación de claro dominio del universo, trasladándose con el tiempo a constituir el único medio de posicionamiento absoluto de un lugar en la superficie terrestre. Este hecho lo aprovecharon los astrónomos y navegantes y durante una larga etapa la investigación se orientó hacia el perfeccionamiento de los aparatos de observación de los diferentes astros así como los instrumentos de dirección de la nave.

Con posterioridad, y una vez conseguidos los perfeccionamientos instrumentales, la investigación se ha orientado hacia el conocimiento de toda circunstancia que altere la correcta toma de información en las campañas de campo, jugando un papel de extraordinaria importancia toda anomalía motivada por la acción directa del magnetismo terrestre.

Muchos focos de investigación han ido surgiendo a lo largo de la historia, de muy diferente categoría. Pero sin duda, en los últimos cuatrocientos años, el suceso más trascendental en el ámbito del perfeccionamiento de la aguja náutica y del estudio de los desvíos fue la labor continuada del Almirantazgo inglés, con los antecedentes de la Academia de Ciencias de París (1.666), auténtico foco de saber astronómico y geodésico, la fundación de los Observatorios Astronómicos de París y de Greenwich y las campañas de observación y cálculo con el objetivo de evaluar las dimensiones y establecer la forma de la Tierra a partir de determinaciones astronómicas.

Además de los Observatorios Astronómicos, es necesario destacar la gran labor del Observatorio de la Marina de San Fernando, del Instituto Geográfico Nacional y del Observatorio Astronómico Nacional, que desde su fundación en tiempos de Carlos IV ha sido una unidad de investigación y apoyo a las funciones geodésicas y cartográficas.



También destacan los trabajos geodésicos que presentan dos aspectos significativos. El primero imbricado con la determinación de la forma y dimensiones de la Tierra y el otro, de claro matiz utilitario, permite, no sólo representar la superficie terrestre sobre un mapa con precisión, sino también se presta a múltiples aplicaciones en el campo de la ingeniería. Para dar rigor a esta materialización se hizo necesario una ingente tarea de caracterizar a vértices geodésicos, elegidos de forma concisa con laboriosas observaciones astronómicas, para determinar puntos Laplace, que permitirán compensar y estructurar la Red en una primera etapa de claro matiz de implantación.

Los últimos años ha sucedido una gran convulsión en los argumentos geodésicos y topográficos. Nace la distanciometría electrónica, permitiendo evaluar distancias con mejor precisión que los ángulos en el marco de los trabajos convencionales. También se inicia y se completa la constelación de satélites GPS que permiten evaluar distancias sobre la superficie terrestre con total fiabilidad y de una forma cómoda, por primera vez desde fuera de ella.

Por lo tanto, el mejor conocimiento de la representación de la Tierra lleva implícito la optimización de los instrumentos que orienten el rumbo para seguir la derrota de un punto a otro. Dejando a un lado los instrumentos mas sofisticados, agujas giroscópicas, compases electrónicos, girolaseres, etc. nos detenemos en el instrumento de orientación clásico: la aguja náutica y su comportamiento a bordo de los buques.

### **1.3.-LA INVESTIGACION DE LA PROBLEMÁTICA NÁUTICA EN LA UNIVERSIDAD.**

En el marco general de las Universidades Españolas, cabe destacar la total insuficiencia de medios, tanto físicos como humanos para acometer cualquier tipo de investigación reglada y eficaz. Por lo que se refiere a los medios físicos, es importante, no sólo la escasez de recursos económicos disponibles, sino también las particulares características de la investigación que obligan a muy costosos equipos de observación y de tratamiento de la información obtenida.

La integración tardía de las Escuelas de Marina Civil en la Universidad ha supuesto un hándicap para el desarrollo y la investigación en nuestro país de todos aquellos temas relacionados con la Marina Mercante, quedando siempre relegados a la importación de Tecnología y conocimientos sobre la misma.

Es relevante, en este sentido, la extraordinaria aportación del Departamento de *Ciencias de los Materiales, Máquinas y Motores Térmicos*, actualmente denominado *Energía y Propulsión Marina*, de la Universidad de A Coruña, donde se ha potenciado los diversos programas de Doctorado, con impartición de cursos de tercer ciclo a los que se unió el Departamento de Ciencias de la Navegación y de la Tierra con claro enfoque hacia las materias náuticas.

Es de esperar la colaboración con otras Universidades y Centros Especializados de que surjan programas-concierto de Investigación

## **2.- MARCO REFERENCIAL DE LA TESIS.**



Un tema de investigación debe colmar totalmente las necesidades, exigencias y deseos del investigador, por ello es el más indicado para realizar la elección, que debe recaer en aspectos específicos, problemáticas concretas. Los principales factores subjetivos que intervienen en el proceso de elección son la afición personal y la preparación o aptitud. En cuanto a los factores objetivos, cuentan sobre todo los medios bibliográficos e instrumentales y, sobre todo, las posibilidades de la documentación o las fuentes en general.

En el contexto de la Marina Civil en su aspecto más amplio y en el de los desvíos de la aguja náutica, en particular, la influencia del magnetismo terrestre en los diversos elementos de construcción del buque tiene una trascendencia de primera magnitud. No limitándose a este efecto particular, la investigación participa de un amplio sentido conceptual, con clara aplicación a la realidad física en los cambios producidos en el campo magnético terrestre. Con el auxilio de una determinada instrumentación, es necesario el conocimiento previo de aspectos tales como:

- Conceptos generalizados de geodesia.
- Modelos de magnetismo terrestre.
- Evaluación, determinación y relación entre los valores de la declinación magnética en coordenadas geográficas claramente diferenciadas.
- Correcciones a aplicar a los valores anteriores.
- Relaciones entre los diferentes modelos de comportamiento de los elementos simulados en el desvioscopio.
- Contraste de los diferentes modelos de correctores.

Dada la trascendencia del tema, se ha adaptado como foco central de la Tesis: "COMPENSACIÓN DEL MAGNETISMO ACCIDENTAL DEL DESVÍO DE ESCORA MEDIANTE UNA TERCERA ESFERA: SU INFLUENCIA EN EL DESVÍO CUADRANTAL".

El análisis de la problemática combinada con profundidad, abarcando todos los fenómenos intervinientes en el proceso de determinación de los desvíos en un sistema local



por procedimientos de clara aplicación real, dejando palpable la posible controversia sobre la posible elección del sistema de compensación de la aguja náutica.

## **2.2.- ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO E HIPÓTESIS DE PARTIDA.**

En la actualidad se conocen una forma concreta los parámetros que definen el desvío de escora y la corrección del mismo mediante un imán vertical de posición variable con el lugar en que navega el barco. También se encuentran analizados otros los modelos, como el Harvey-Raynes, aunque no esté ejecutado un riguroso contraste adicional de los parámetros que en cierta medida pueden contribuir a realizar el ajuste.

El estado actual de las investigaciones y desarrollo de la técnica referente a la problemática de la compensación del desvío de escora no están siendo tratadas desde hace años.

Partiendo de las bases establecidas, la presente investigación se orienta en el sentido de responsabilizar al hierro dulce de a bordo como procesador general de alterador de los datos tomados para la compensación del desvío de escora, analizando toda la casuística que se pueda presentar y sacando conclusiones de los diferentes reguladores del proceso global.

También se establece un contraste real del rango de variabilidad en función de las diversas escoras con la expresión del mejor ajuste, procediendo a la toma de datos a través del Desvioscopio, así como la de los resultados obtenidos.

Es necesario planificar una actuación generalizada en el marco general del estado del conocimiento en un triple sentido:

- Descripción pormenorizada de una base referencial para la determinación del desvío de escora.
- Descripción y análisis del comportamiento de la aguja náutica para conocer sus elementos de configuración, sus parámetros significativos y su comportamiento intrínseco, permitiendo el contraste variacional de sus valoraciones finales.
- Análisis y contraste de mediciones reales y datos reales obtenidos en laboratorio en el marco de un trabajo de precisión.

Es necesario por lo tanto el establecimiento de la base conceptual adecuada, para impulsar la nueva orientación. Para ello es preciso caracterizar totalmente el

comportamiento de los diversos hierros intervinientes analizando su respuesta y sometiendo el conjunto a una contrastación real que comprenda los casos más representativos.

### **3.- METODOLOGÍA.**





### 3.1.- IMPLANTACION DE UNA METODOLOGIA OPERATIVA.



La investigación científica, desde Galileo y Newton, ha seguido el esquema secuencial y lógico:

La interacción entre SUJETO (investigador) y OBJETO (fenómeno investigado), necesita la presencia de los mecanismos de transmisión adecuados que, en parte, hipotecan el valor global del conocimiento.

La implantación de una correcta metodología, como elemento guía en el trabajo científico, es la primera labor del investigador, configurando de esta forma el marco soporte durante todo el proceso.

El contenido de la presente investigación precisaba de un soporte metodológico operativo, capaz de orientar el proceso por los cauces necesarios para constituir y establecer las conclusiones finales.

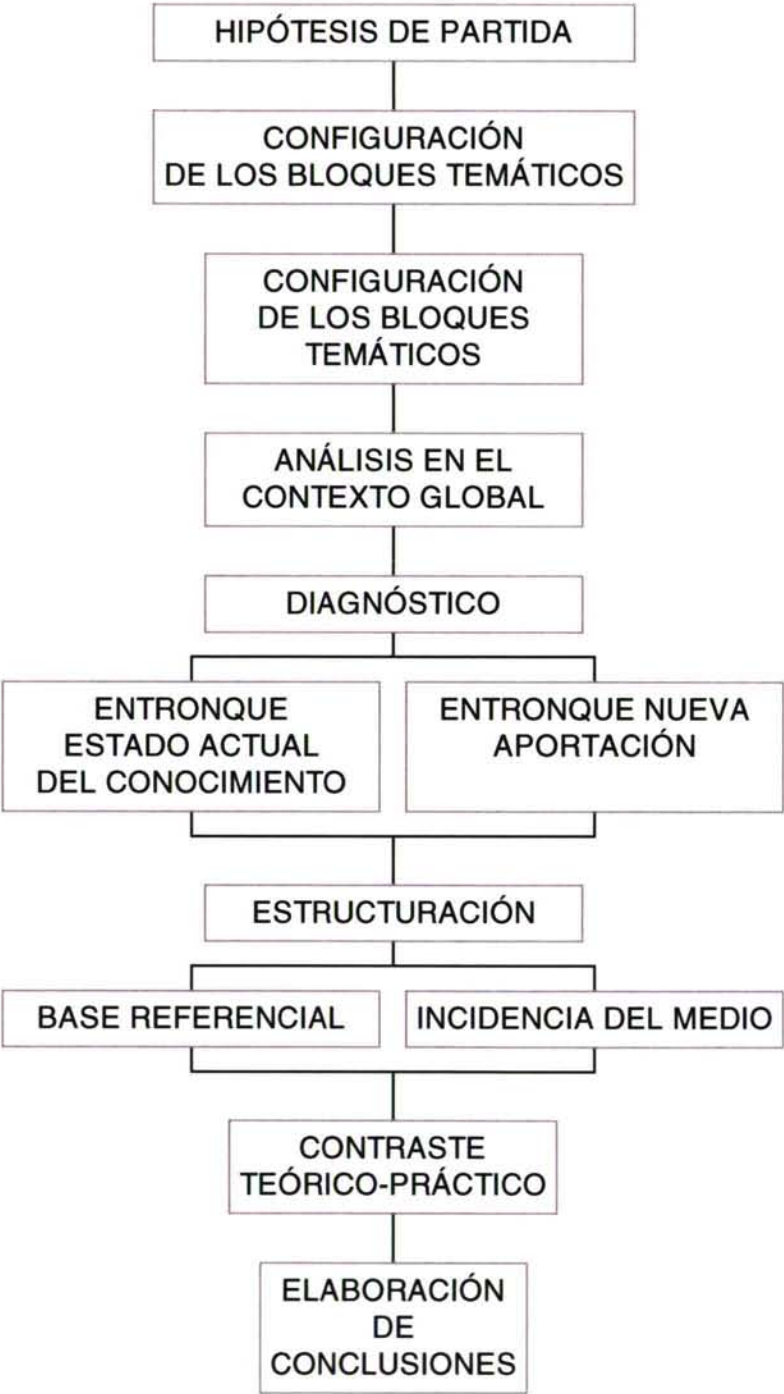
La metodología utilizada en la presente Tesis Doctoral, y que en forma esquemática se reproduce en el gráfico adjunto, responde a las exigencias de las investigaciones de contenido tecnológico de índole evolutivo, que en este caso presupone el establecimiento compacto de tres bloques cerrados pero interactivos entre sí. El primero es teórico y referencial y en él se vuelca todo el conocimiento necesario para el enganche posterior. En la base referencial así configurada se estructuran las herramientas del magnetismo en el más amplio de los sentidos.

El segundo bloque analiza el medio (hierros del buque) donde están los elementos que caracterizan la investigación desde el enfoque unitario y conjunto, marcando a priori un esquema de comportamiento.

En el tercer bloque, se estructuran los modelos de comportamiento para su posterior conjunción y contraste, estableciendo catálogos de resultados finales.

Como elemento final, se contrasta con observaciones reales realizadas en el marco de un trabajo de precisión.

A partir de los resultados obtenidos se establecen las conclusiones y se orienta hacia futuras líneas en la Investigación operativa de la Compensación de la aguja náutica.



### **3.2.- DESCRIPCION PORMENORIZADA.**

Tras el establecimiento de las hipótesis previas, se procede a la búsqueda de los bloques temáticos precisos para realizar la labor de análisis.

Las líneas seguidas para configurar bloques temáticos, están en relación directa con los objetivos a lograr. Para ello se acometió una profunda búsqueda de la documentación relativa al tema existente en los archivos y bibliotecas especializadas, que han permitido referenciar una parte del trabajo y poner de manifiesto un documentado estado actual del conocimiento.

Con su análisis se pretende recopilar metodologías que contribuyan a definir la evolución sufrida y a esclarecer de una forma concisa los resultados de las investigaciones involucradas en la que se desarrolla en el presente trabajo de investigación.

#### **LINEA A.- MEDICIONES EN EL CONTEXTO TERRESTRE.**

Se pretende establecer la base de referencia de los elementos participantes.

- Introducción al magnetismo.
- Campo magnético terrestre.
- Modelo de campo magnético a aplicar.

#### **LINEA B.- INCIDENCIA DE LOS ELEMENTOS INTERVINIENTES EN EL DESVÍO CON EL BUQUE ADRIZADO.**

El objetivo de la línea es caracterizar los parámetros que intervienen en el proceso global de los datos obtenidos.

- Características de la aguja náutica.
- Propiedades de las distintas clases de hierros empleados en la construcción de buques.
- Características de los elementos correctores.
- Modelos de comportamiento de la aguja en función de los desvíos implicados.
- Modelos de corrección de los mismos.

#### LINEA C.- CONTRASTE TEORICO DEL DESVÍO DE ESCORA.

Se contrastan teóricamente los diferentes aspectos que se relacionan.

- Implicación de las fuerzas que originan el desvío de escora.
- Anulación del mismo desde la perspectiva clásica.
- Análisis de la anulación particularizada mediante otro corrector alternativo.
- Establecimiento de las ecuaciones.

#### LINEA D.- CONTRASTE PRÁCTICO EN LABORATORIO.

Aprovechando los elementos facilitados por el desvioscopio, se configuran una serie de condiciones particularizadas.

- Preparación y ajuste del modelo.
- Evaluación de los datos obtenidos

Con la ordenación comentada, se configura un conjunto de bloques compactos a través de los cuales, y tras el profundo análisis general individualizado, se puede establecer el diagnóstico final, en cuanto al establecimiento de las bases de referencia necesarias para articular convenientemente los entronques al estado actual del conocimiento y a la nueva aportación de la investigación.





#### **4.- PROCESO DE ELABORACION Y CONTENIDO.**



#### **4.1.- PREPARACIÓN, RECOPIACIÓN DEL MATERIAL Y ANÁLISIS INDIVIDUALIZADO.**

Elegido el tema libremente, se optó por realizar una intensificación programada de la lectura de monografías y bibliografía especializada que existen en diversas bibliotecas, así como consultas a través de la red. Tras su lectura y análisis se iban confeccionando fichas referenciales bibliográficas y preparando aquellos artículos de interés que se encontraban adscritos al texto.

Todas las fases de la investigación han quedado anotadas en un diario, ya que, desde que fue analizado el primer texto hasta que se concluyó el último, se han ordenado de forma cronológica y temática, en carpetas independientes, con lo cual se ha configurado un bloque compacto fácilmente reproducible.

La llegada de la documentación fue dispar y fue preciso realizar una primera criba para seleccionar entre el material que iba llegando, aquella información que no guardaba una relación afín, o bien no presentaba un contenido de interés específico.

Una vez realizada la totalidad de la "marcha bibliográfica", se procedió a estudiar detenidamente los textos, transcribiendo lo esencial de los mismos, traduciendo los extranjeros, completando las fichas bibliográficas y caracterizando las fuentes, configurando de cada autor (investigador), las fuentes directas, para disponer de dos tipos de referencias: directas e indirectas.

Tras elaborar los bloques temáticos y caracterizar los entronques básicos, se procedió a elaborar el bloque central individualizado de la investigación.



#### **4.2.- ELABORACIÓN PORMENORIZADA.**

La elaboración de la Tesis, se realizó en dos etapas claramente diferenciadas.

En la primera etapa se confeccionaron los guiones y se procedió al encaje de los primeros artículos del Capítulo II, que sirvieron para confeccionar el documento que permitió hacer la defensa de la Suficiencia Investigadora. Una y otra labor, de forma provisional. Para el diseño de los guiones, se procedió del siguiente modo:

- Tras un repaso pormenorizado de todo el material analizado, se ha buscado el detalle más significativo del bloque individualizado.
- Posteriormente se establecieron los cuadros sinópticos, en los que aparecían resumidas las partes esenciales de los textos.

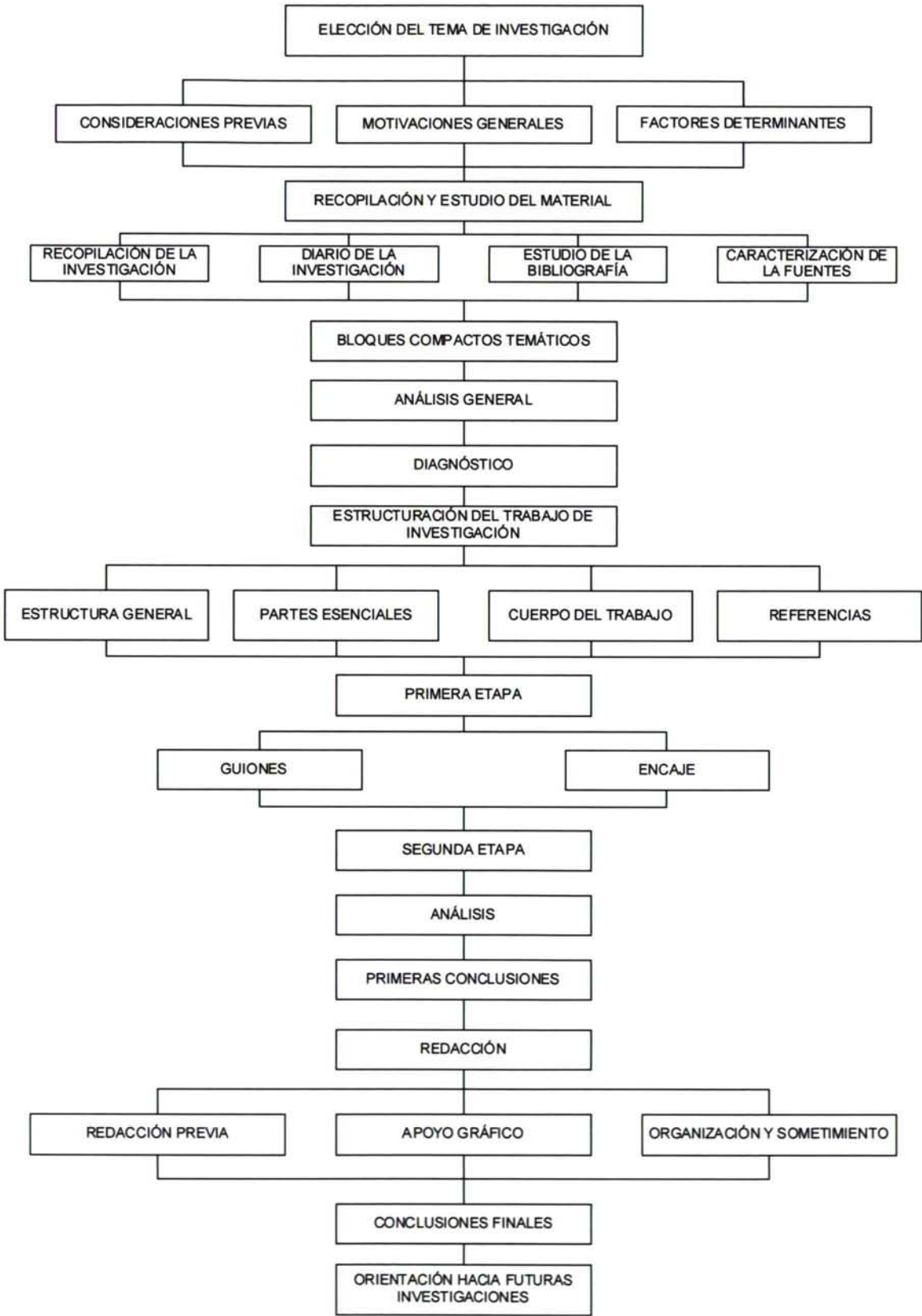
Tras la asignación correspondiente guión/contenido, se procedió a ejecutar la última parte del trabajo.

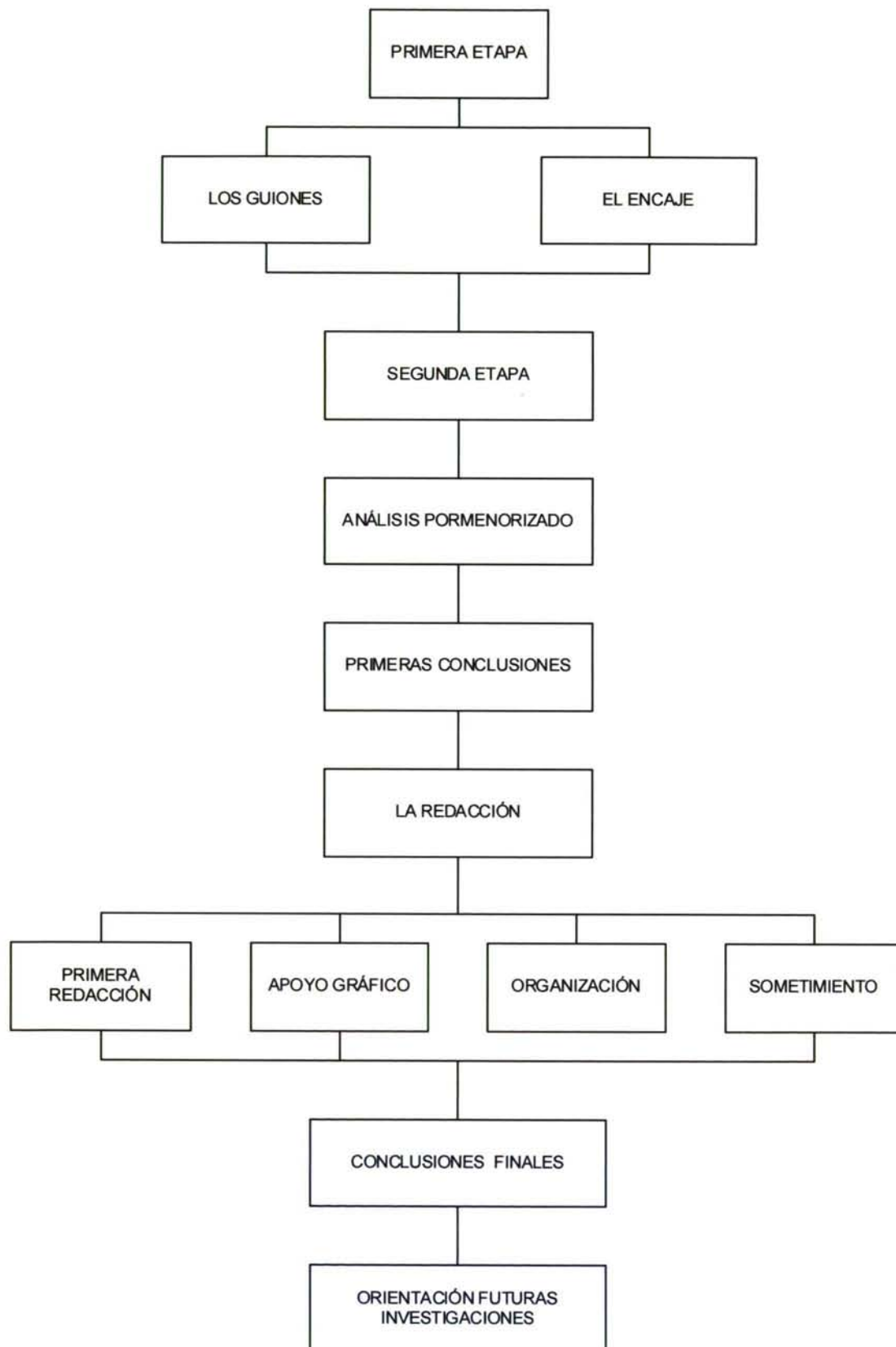
Simultáneamente se realizó un doble estudio:

- Analizar los diferentes elementos que entroncaban de forma directa con la información que fue apareciendo en la Documentación consultada, transcribiendo su intervalo de validez y comprobando el rango de variabilidad.
- Para simular la total incidencia de los parámetros intervinientes y contrastar los diferentes protagonistas, se han dispuesto una serie de elementos en laboratorio (desvioscopio, aguja magnética oscilante, trípodes, etc.) que ha facilitado la puesta a punto de los resultados tratados así como la posibilidad de materializar todo tipo de datos y obtener una amplia gama de resultados.

Tras los resultados obtenidos, se pudieron obtener las primeras conclusiones y se comenzó a redactar el definitivo texto.

En el gráfico adjunto se indican, en esquema, los pasos más significativos del proceso de elaboración.





#### **4.3.- CONTENIDO GLOBAL Y DISCRETIZADO.**

Atendiendo al esquema metodológico impuesto, la Tesis se articula en cinco capítulos:

I.- PLANTEAMIENTO GENERAL DE LA INVESTIGACIÓN

II.- MARCO REFERENCIAL DEL ÁREA DE INFLUENCIA.

III.- INCIDENCIA DE LAS NUEVAS FUERZAS QUE ORIGINAN EL DEVÍO DE ESCORA Y SU ANULACIÓN.

IV.- CONTRASTE TEÓRICO/PRÁCTICO EN LABORATORIO.

V.- CONCLUSIONES Y DIRECTRICES GENERALES PARA FUTURAS INVESTIGACIONES.

El primer Capítulo recoge la introducción general, estableciendo los aspectos adicionales, pero necesarios, como las características básicas de la investigación, la génesis del tema elegido, los límites referenciales de la problemática, así como la metodología a seguir.

El segundo Capítulo comienza por una introducción a los dipolos magnéticos, las leyes que definen sus propiedades y el entorno de los campos magnéticos. Se estudian las características del campo magnético terrestre y el modelo a aplicar del mismo para enlazar con el establecimiento de las ecuaciones del desvío provocado en la aguja por la influencia de los hierros de a bordo, así como los procedimientos de anulación y características de los correctores empleados, todo ello desde la condición de buque adrizado.

El Capítulo tercero está dedicado al estudio de la variación de los desvíos originados por la escora del buque, estableciendo las nuevas ecuaciones del desvío con el buque escorado y el desarrollo del cuerpo central de la Tesis, es decir, la anulación del desvío originado por el magnetismo accidental mediante la introducción de una tercera esfera y su incidencia en el desvío cuadrantal. Se establecen las propuestas teóricas de dicha corrección y se preparan las ecuaciones para su aplicación.

El Capítulo cuarto se describen los diversos elementos de laboratorio (desvioscopio, aguja magnética oscilante, fluxgate) y se procede a efectuar el contraste teórico-práctico



sobre los diversos ángulos de escora, analizando individualmente cada modelo y los resultados de su aplicación sobre un determinado rango de valores de las variables intervinientes finalizando el capítulo con un catálogo general de los resultados de la comparación entre los datos reales obtenidos y los resultados teóricos de cada uno de los modelos. También se hace un contraste de otros aspectos de singular trascendencia.

Finalmente, el Capítulo quinto presenta las conclusiones de la investigación realizada, proponiendo nuevas líneas de investigación que continúen el camino emprendido. En especial, se considera de gran interés profundizar en el estudio del comportamiento de otros hierros de un rango inferior de trascendencia, pero de una indudable significación científica.

A lo largo del texto aparecen las referencias bibliográficas más significativas y se intercalan figuras en su momento o, en algunos casos, en la página inmediata siguiente, con el fin de dotar de una mayor claridad al conjunto, incluyendo también la referencia, caso de tenerla.

En el establecimiento de expresiones numéricas o paramétricas, se ha preferido indicar la clarificación de la simbología utilizada, con el fin de hacer más comprensible el texto, para lo cual se introduce un índice general de las expresiones simbólicas empleadas en el presente Trabajo de Investigación.

De igual modo, se introduce un índice general de los apoyos gráficos ilustrativos, que facilite al lector una visión general de los mismos.

Por último, y como es de rigor, se incluye la relación alfabética de autores de la Bibliografía consultada para llevar a buen término el presente trabajo.



## **CAPÍTULO II: MARCO REFERENCIAL DEL ÁREA DE INFLUENCIA**



## **1.- INTRODUCCIÓN AL MAGNETISMO. CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE.**



### 1.1.-ANTECEDENTES HISTÓRICOS DE LA COMPENSACIÓN.

Antes de la aplicación del vapor al movimiento de los buques, cuando en la construcción y armamento de estos no entraban las considerables masas de hierro que tanto influyen sobre la aguja náutica, era suficiente con tomar por corrección la variación que señalaban las cartas, aunque para comprobación se determinase diariamente en los buques por medio de la declinación, en el movimiento del orto u ocaso del sol, sin cambiar el rumbo a que se gobernaba. Si resultaba diferencia no se atribuía a la acción magnética del vaso, sino a error en la marcación o en el cálculo, y al término del viaje se achacaban los errores a corrientes. Lo cierto es que en gran parte los errores producidos se debían al empleo, en el cálculo, de una variación magnética distinta de la que existía en realidad.

Lo que hoy se llama desvío, que no es otra cosa que la perturbación que producen en el compás magnético las fuerzas ocasionadas por las masas férreas existentes en el buque, proporcionó, en su día, el medio de corregir los errores del único instrumento que en aquella época guiaba al navegante por los mares.

Las primeras noticias de los efectos producidos por la variación local, si bien aún se ignoraba la causa a que debían atribuirse, fueron dadas en 1684 por el Capitán Sturmy y por W. Dampier, en el transcurso de un viaje a Nueva Guinea analizando el contenido de una de las obras de Laurent Real publicada en 1651, sobre los errores de la aguja.

Hasta un siglo después, no se habló más del desvío. Esto ocurrió durante la época de los viajes del Capitán Cook, cuando uno de los astrónomos que llevaba en su expedición, Mr. Wales, volvió a llamar la atención sobre él. Se cree que Walles llegó a sospechar la verdadera causa de las irregularidades de la aguja. Aseguraba que las variaciones observadas a varios rumbos de aguja diferían entre sí unas de otras si se trasladaba la aguja a diversos lugares del buque (conservando la proa en una misma dirección), siendo mucho mayores estas diferencias cuando las observaciones se verificaban en distintos buques.

En 1786, D. José Mendoza y Ríos, refiriéndose a las masas de hierro existentes a bordo decía:

*“Estas grandes masas pueden producir alteraciones considerables en la dirección de la planchuela”.*

Desde 1790 a 1795, Vancouver, en su viaje al rededor del mundo, también observó algunas irregularidades que afectaban la precisión de la aguja a la salida del Canal de la Mancha, y más tarde fueron notadas estas mismas irregularidades por el Capitán Phipps en la expedición que hizo al polo Norte. Pero la realidad es que ninguno de los marinos que se ocuparon de esta cuestión pudo adivinar la causa de estos curiosos fenómenos.

Mr. Dowine, piloto de la fragata de *S.M. B. Glory*, en 1790, fue quien dio claramente a conocer que las perturbaciones que se observaban en las agujas náuticas eran motivadas por las masas de hierro que contenían los buques. Mr. Dowine, en el tratado que sobre el magnetismo publicó Walker en aquella fecha, se expresa de este modo:

*“Estoy convencido de que la cantidad y proximidad del hierro en la mayor parte de los buques, ocasiona la atracción de la aguja, pues acredita la experiencia que, no solo varía aquella de dirección colocándola en diverso lugares del buque, sino que prueba también que dos buques que navegan a un mismo rumbo no siguen direcciones exactamente paralelas, como debiera suceder, aunque sus agujas, comparadas recíprocamente a bordo de cualquiera de ellos, concuerden entre si.”*

En 1799, Van-Lowernon, oficial de la Marina Danesa, publicó una memoria muy extensa, fruto de su propia experiencia, que fue insertada en las obras de la *Real Sociedad de Ciencias de Dinamarca*.

Los estudios de Dowine quedaron relegados al olvido hasta que en 1805 el Capitán Flinders, de la fragata de *S.M. B. Investigator*, notó que las marcaciones hechas a tierra antes y después de una virada, diferían 10° próximamente cuando la proa del buque cambiaba casi del Este al Oeste; pero que la diferencia era pequeña o nula cuando la proa cambiaba del Norte al Sur, caso en que era una misma la dirección del meridiano magnético y la de la sección longitudinal del buque.

De regreso a Inglaterra en 1810, comunicó sus observaciones al Almirantazgo, y sus Lores, apreciando la utilidad de los experimentos realizados sobre las agujas del



*Investigator*, le facilitaron otro buque de guerra para que ejecutase en él los ensayos que juzgase convenientes.

Con el resultado de ambos estableció los siguientes principios:

1. Marcando a bordo cualquier objeto distante, las marcaciones eran distintas si se trasladaba la aguja a diferentes lugares del buque.
2. Cuando la quilla del buque se hallaba en la dirección del meridiano magnético, la variación local era nula, puesto que hallándose en dicha dirección la atracción de las masas férreas existentes a bordo, se anulaba y confundía con el magnetismo terrestre.
3. Cuando la proa del buque se dirigía al Este u Oeste magnéticos, los efectos de la variación local alcanzaban su máximo, y en los rumbos intermedios dicha perturbación variaba en razón del seno rumbo.
4. En una misma aguja el valor máximo de este desvío variaba en distintos lugares del globo, y esta variación estaba relacionada con la inclinación que adoptaba la aguja según la distancia a que se encontrara el buque del ecuador magnético.

El Almirantazgo inglés, en 1812, hizo repetir en cinco buques las experiencias hechas por Flinders, con objeto de comprobarlas y de fijar las reglas que había deducido. Estos trabajos, sin dejar de confirmar la parte experimental de los verificados por Flinders, demostraron que sus reglas empíricas no daban siempre para el desvío los valores teóricos calculados, y que por lo tanto eran necesarios nuevos estudios.

En 1819, el Capitán Scoresby publicó una memoria sobre las anomalías de la aguja, como resultado de las observaciones que había hecho tres años antes, durante el viaje para la pesca de la ballena a las regiones árticas.

Hacia esta misma fecha, estando para zarpar la expedición de Ross y Parry, destinada a descubrir el paso Noroeste en los mares del polo Norte, y siendo el general Sabine el encargado de la parte científica, se adoptó por primera vez a bordo de los buques *Isabella* y *Alexander*, la instalación de una aguja en el lugar del buque en que la acción de la fuerza magnética fuese la menor. A dicha aguja se referían todos los rumbos y

marcaciones, empezándose entonces a formar las tablas de desvíos por los métodos que hoy se conocen.

Pedro Barlow de Wolwich, reuniendo las observaciones hechas en las expediciones polares de Ross y Parry y las del Capitán Scoresby, escribió en 1820 su "*Essay on magnetic attraction*", detallando la construcción del instrumento corrector que lleva su nombre, y con el que trataba de neutralizar los efectos de la variación local.

Los grandes desvíos y la manera regular con que se manifestaron en los buques que fueron a dichas expediciones polares, llamaron la atención del eminente matemático Poisson, que en 1824 escribió dos memorias sobre este asunto. En la primera daba la teoría matemática de la inducción magnética terrestre; en la segunda presentaba una serie de fórmulas en función de varios coeficientes, cuyos valores debían obtenerse por medio de la observación. En 1839, adoptó estas fórmulas para el caso particular de la distribución simétrica longitudinal del hierro a bordo.

En este mismo año, Mr. Airy, Director del Observatorio de Greenwich, después de cuidadosas experiencias hechas a bordo de dos buques de hierro, *Rainbow* e *Iron Sides*, propuso corregir los desvíos por medio de barras magnéticas y de hierro dulce. Este método no dio resultados tan satisfactorios como se esperaban en un principio, y cayó en desuso.

Mr. Archibald Smith, uno de los sabios ingleses que más se han ocupado del desvío de aguja, dedujo de las ecuaciones fundamentales de Poisson fórmulas sencillas y de fácil ejecución, en las cuales incluía los efectos, tanto del magnetismo inducido en el hierro dulce, como del magnetismo permanente del hierro duro.

En 1851 fueron reducidas a tablas y publicadas por el Almirantazgo inglés las fórmulas de Smith. Al mismo tiempo se publicaron instrucciones para la determinación del desvío y de los cinco coeficientes que entran en su ecuación.

Mr. Scoresby, después de numerosas observaciones hechas sobre el desvío en los buques de hierro, dedujo que dependía también, en parte, de la dirección en que se hallaban los cascos durante su construcción. Ya en 1835 había iniciado esta idea el Capitán Johnson. El año 1854, en la reunión de la asociación británica celebrada en Liverpool, Mr. Scoresby trató otro asunto relativo al desvío de la aguja: las variaciones regulares o accidentales que



tienen lugar en el magnetismo de los buques. Coincidió esto con la pérdida del vapor *Taileur*, en el cual fallecieron 290 personas. De las conclusiones obtenidas nació en Liverpool el *Liverpool Compass Committee*, cuyos trabajos fueron publicándose sucesivamente.

Preocupado Scoresby con la idea de observar las variaciones del magnetismo que se producen accidentalmente, así como de los fenómenos inherentes al cambio que sufre la influencia del hierro en los buques en el Hemisferio Sur, decidió embarcarse a bordo del *Royal Charter*, para hacer un viaje a Australia. Los resultados de sus observaciones, fueron mostrados al Comité de Liverpool sintetizados en los puntos siguientes:

1. El magnetismo de los buques de hierro se halla distribuido en obediencia de leyes precisas y determinadas.
2. Durante la construcción de los buques de hierro, se desarrolla en ellos un estado magnético definitivo, el cual nunca se pierde aunque algo se modifique después.
3. Botado el buque al agua, pierde una parte considerable de su magnetismo; pero la cantidad y dirección del que conserva no se modifica ya sino de un modo lento y gradual.
4. El magnetismo original de un buque de hierro está constantemente sujeto a pequeñas fluctuaciones, que provienen de nuevas inducciones magnéticas.
5. Los desvíos de aguja causados por la parte permanente del magnetismo de los buques de hierro, pueden compensarse con ventaja, y esta compensación iguala la fuerza directriz de la aguja a los diferentes rumbos que puede seguir la nave.

Hoy día, uno de los errores de aguja más importantes en los buques de acero, principalmente en los de recreo, es el desvío de escora. Su conocimiento es esencial ya que el desvío que se tiene para un rumbo se altera en mayor o menor medida, según la banda a que se halla inclinado el buque.

Fue Mr. Archibald Smith quien se alzó con la gloria de resolver este importante problema, deduciendo de las mismas fórmulas fundamentales de Poisson las expresiones

que indican las alteraciones que tienen lugar en los coeficientes a causa de la inclinación del buque.

En 1862, se publicó la importante obra titulada *Admiralty Manual for the deviations of the compass*, escrita por Mr. F.J. Evans y Mr. Archibald Smith. Al año siguiente se hizo una segunda edición, mejorada con métodos más fáciles para la determinación del desvío por medio de procedimientos gráficos muy prácticos.

Inmediatamente después de su publicación fue traducida, con alguna modificación, a los siguientes idiomas:

- Al ruso, por el Capitán Belavenetz, oficial de la marina imperial, autor de varias obras sobre el desvío de las agujas. Uno de sus últimos libros fue de gran valor, por presentar gran número de ejemplos de determinación de los desvíos en los buques de guerra y acorazados, así como cálculos por diversas fórmulas y procedimientos gráficos.
- Al francés, por Mr. Darondeau, en su *Cours des regulations des compas à l'école du genie maritime*.
- Al alemán, por Herr Shaub, Director de Hidrografía de la marina imperial de Austria.
- Al portugués, por el Sr. Brito Capello, Director del Observatorio de Marina en Lisboa.
- La obra también fue adoptada por los Estados Unidos, donde ya se habían publicado para el servicio de la marina las diferentes memorias que se escribieron en Inglaterra sobre el desvío de las agujas.

En 1869 apareció la tercera edición, mejorada en cuanto a la presentación de las ideas, y aumentada con algunos ejemplos, a fin de hacer este trabajo más inteligible.

En 1874 Sir William Thomsom, posteriormente Lord Kelvin empezó a escribir un artículo en *Good Words* sobre el tema magnetismo terrestre y el compás marítimo. No le

quedó otro remedio que reconocer que el asunto que en principio parecía fácil no se podía tomar a la ligera de ningún modo y para hacerle justicia era necesario que, como él mismo reconoció, aprendiese su asignatura. Realizó esto en los 5 años siguientes y el artículo se publicó en 1879 una vez inventada la Aguja Thomsom que ha sido la clave hasta la época contemporánea.

No sólo los marinos extranjeros hicieron avances en este terreno. Los españoles también se preocuparon por determinar los desvíos de la aguja náutica.

En primer lugar hay que mencionar la memoria publicada a mediados del pasado siglo, en *La España Marítima*, por el Sr. Sánchez Cerquero, Director del Observatorio de Marina de San Fernando.

En el año de 1848 el Capitán de fragata don Guillermo Chacon, llevó a cabo una serie de observaciones y experiencias con la corbeta de su mando *Villa de Bilbao*, con el fin de investigar el desvío de las agujas en aquel buque de madera, para ser comparadas con los resultados de las investigaciones realizadas en los vapores de hierro construidos en aquellas fecha.

También por esa fecha se publicó la *Memoria Descriptiva del Círculo de Marcar y Sus Aplicaciones*, por el Jefe de Escuadra D. Antonio Doral con el objetivo de aclarar la inutilidad de emplear a bordo varias agujas colocadas en distintas posiciones, y porqué se debían referir a una sola todas las observaciones. En su memoria se podía leer además el método para investigar el desvío de la aguja en cada uno de sus rumbos, y la diversa aplicación que para otros problemas náuticos tenía el instrumento inventado por el general Doral. Todo esto acompañado de las fórmulas analíticas para su resolución, halladas por el Sr. Saturnino Montojo, sucesor en la dirección, del Observatorio astronómico del Sr. Sánchez Cerquero.

En 1853 ordenó el Gobierno que la corbeta *Ferrolan*, al mando del Capitán de navío D. José Lozano, corriera la costa de España y Portugal, con el único fin de observar la declinación magnética e inclinación de la aguja, y de comprobar las teorías existentes para el cálculo del desvío. Se dotó al buque una completa colección de instrumentos y la oficialidad fue dividida en secciones para repetir y comprobar los trabajos de observación.



De los medios conocidos para determinar los desvíos, tanto en puerto como en la mar, se ocuparon también los periódicos y en especial la *Revista General de Marina*, que en 1866 tradujo una memoria de Archibald Smith. Al año siguiente se publicó la explicación del método gráfico para representar los desvíos según las teorías del Sr. Napier, escrito por el Sr. Cecilio Pujazón.

Posteriormente apareció en el Anuario de la Dirección de Hidrografía, tomo VIII, la traducción de la primera y segunda parte del *Admiralty Manual for the Deviations of the Compass*, traducida en 1871 por el Sr Cayetano Lobatón y Aranda en su *Manual Para la Determinación de los Desvíos de la Aguja Náutica*. En esta obra se exponían todos los métodos de cálculo de los desvíos de forma que los navegantes pudieran corregirlos con los medios que se disponía a bordo de los buques, en la mar.[TERR-875: IX/XVIII]

Desde finales del s. XIX hasta el presente se ha hecho un trabajo muy útil en lo que respecta al diseño del compás. Se han llenado muchas páginas sobre la materia y se ha llevado a cabo una gran labor de investigación de la que incontables nombres de muchos países permanecerán en el anonimato. Durante todas las investigaciones permanece la apreciación constante de los efectos de las fuerzas de desvío y de los medios por los que pueden ser eliminadas. Las teorías básicas fundadas por los pioneros, aunque establecidas hace mucho tiempo, han sido modificadas por varios investigadores y por los esfuerzos de corporaciones como el primitivo Comité del Compás de Liverpool o el Departamento del Almirantazgo. Estos descubrimientos se han ido recogiendo y publicando de cuando en cuando en varias ediciones del *Manual del Almirantazgo sobre Desvíos del Compás*. En los años posteriores a la Segunda Guerra Mundial el tema del desvío de la aguja se fue perfeccionando al añadirle ciertas consideraciones que se hicieron necesarias cuando los barcos eran gaussianos como un antídoto a las minas magnéticas de la propia Guerra. El uso de agujas magnéticas en la aviación y en los tanques de guerra supuso nuevos problemas y nuevas consideraciones que fueron estudiadas en su momento por el Departamento del Almirantazgo.

Como resultado de esos estudios, apareció la edición de *La Teoría del Desvío de la Aguja Magnética*. Este tratado sobre la materia fue escrito por el Comandante G. N. Harvey, O. B. E., Ph. D., B.Sc (Eng.) R.N., bajo la dirección del director del Almirantazgo



del Departamento del Compás. No solo incluye una recapitulación de los descubrimientos originales, tal y como fueron publicados en ediciones anteriores, sino que también indaga y explica hasta las ecuaciones fundamentales de Poisson.

El Comandante Harvey, con la ayuda del Comandante J. S. Raynes, R. N., y de Mr. T. H. O'Beirne, también aportó varias innovaciones respecto a la corrección de los desvíos de la aguja magnética. Con la llegada del Compás de Transmisión Magnético se abrió otra puerta para las aplicaciones de uso general.

Los últimos 200 años, por tanto, contienen todas las investigaciones profundas hechas en conexión al primer instrumento de navegación marítima. Se ha convertido en un instrumento de precisión aunque idéntico en esencia al inventado por Lord Kelvin [GRAN-76:x].

## 1.2.- MAGNETISMO

### 1.2.1.- IMANES. DIPOLOS MAGNÉTICOS.

Es sabido que un imán es un trozo de hierro que goza de dos propiedades muy particulares: atrae al hierro y tiende a colocarse en una dirección determinada en el espacio. La fuerza atractiva sobre el hierro se encuentra especialmente concentrada en dos regiones llamadas polos, situadas en los extremos del imán. Un imán lineal tiene sus polos casi en los dos puntos extremos, y si es libremente móvil, se coloca aproximadamente en la dirección Norte-Sur. En esto se basa el empleo del imán como *brújula*. El fenómeno del *magnetismo* se conoce desde la más remota antigüedad (Thales de Mileto, alrededor de 639-546 a.C.), habiéndose observado primeramente en ciertos minerales de hierro que se utilizaron en la navegación desde muy antiguo; en Europa desde 1200 d. C. aproximadamente.

Los dos polos de un imán presentan comportamientos opuestos. Al estudiar dos imanes se observa que el polo de uno de los imanes que señala hacia el Norte, repele al otro imán que señala también hacia el Norte y atrae al que señala hacia el Sur. Luego, externamente, hay una analogía entre los polos magnéticos y las cargas eléctricas positivas y negativas. Un polo magnético que señala hacia el Norte se denomina *polo norte o polo positivo*, y si señala hacia el Sur, se llama *polo sur o polo negativo*; ambos polos no se diferencian en nada en cuanto a sus acciones sobre el hierro no magnético, así como las cargas positivas y negativas no se distinguen al actuar sobre cuerpos descargados.

Resulta, pues, que un imán constituye un *dipolo magnético* semejante a un dipolo eléctrico. Sin embargo, la semejanza es puramente externa, pues los dos tipos de dipolos presentan una diferencia capital. Si se descompone un dipolo eléctrico, de modo que en una parte quede un polo positivo y en la otra el negativo, el dipolo queda destruido y se obtienen dos cargas eléctricas libres  $+e$  y  $-e$ . Si se toma una aguja de coser y se pone al rojo, sumergiéndola luego en agua fría para templarla, se puede convertir en un imán con solo frotarla longitudinalmente con un imán. Pues bien, al romperla por el centro, en vez de obtener dos polos magnéticos libres  $+m$  y  $-m$ , se obtienen dos dipolos magnéticos (Pierre de Maricourt). En los dos extremos recientes se producen dos polos de igual intensidad que

los primitivos y de signos opuestos a los del otro extremo respectivo. Repitiendo la operación tantas veces como se quiera, se llega siempre al mismo resultado, nunca se obtiene polos magnéticos libres. Los polos magnéticos se presentan en la Naturaleza siempre a *pares*. No existe magnetismo libre (verdadero); es decir, jamás se presentan cargas magnéticas separables que correspondan a las cargas eléctricas. Esta es la diferencia fundamental existente entre el Magnetismo y la Electricidad.

La Intensidad de un polo magnético se designará con el símbolo  $p$ . Las intensidades de los polos positivo (+  $p$ ) y negativo (-  $p$ ) de un imán, son siempre iguales en magnitud y se define el *momento magnético* de un dipolo magnético como vector

$$\vec{M} = p \vec{l} \quad \text{módulo} \quad M = p l \quad [\text{II.1}]$$

siendo, módulo  $l$ , la distancia entre dos polos, dirigida desde el polo negativo al positivo. El vector  $\vec{M}$  tiene la misma dirección que él. La distancia entre los dos polos de un imán siempre es algo menor que su longitud.

En realidad, no existen polos magnéticos aislados, sino sólo dipolos magnéticos, pero, de todos modos, muchas veces resulta útil la consideración de polos magnéticos sueltos. Con gran aproximación pueden realizarse mediante un imán muy largo y fino, para que en la proximidad de uno de los polos pueda desprejarse la acción debida al otro polo. En las consideraciones teóricas puede pasarse al caso límite de un imán infinitamente largo, en el cual la acción del segundo polo es completamente nula.

### 1.2.2.- LA LEY DE COULOMB APLICADA A LOS POLOS MAGNÉTICOS.

Mediante el artificio de un imán largo, que se acaba de indicar, es posible medir la fuerza que actúa entre dos polos magnéticos. Por ejemplo, puede colgarse un imán de una balanza y aproximarle por debajo un segundo imán, de modo que entre dos polos del mismo nombre ejerza una repulsión mutua, que puede medirse colocando pesas en el platillo. (La dificultad consistente en que no se conoce anticipadamente la posición exacta de los polos, se puede evitar disponiendo las medidas de modo apropiado). Se puede proceder escogiendo provisionalmente un polo magnético cualquiera como polo unidad y midiendo la fuerza que ejerce con respecto a un segundo polo cualquiera situado a una



distancia determinada. A cualquier otro polo se le puede atribuir una intensidad  $p$ , proporcional a la fuerza que experimenta cuando se coloca a la misma distancia de este segundo polo. Cuando se han calibrado en la unidad provisional dos polos, por lo menos, se puede medir la fuerza ejercida entre estos en función de la distancia. Sean  $p$  y  $p'$  las intensidades de dos polos magnéticos y  $r$  su distancia. Las medidas dan la *ley de Coulomb* para la fuerza  $f$  ejercida entre los dos polos:

$$f = \frac{1}{K_m} \frac{p p'}{4\pi r^2} \quad \text{y, vectorialmente,} \quad \vec{f} = \frac{1}{K_m} \frac{p p'}{4\pi r^2} \frac{\vec{r}}{r} \quad [\text{II.2}]$$

Dicha ley tiene idéntica forma que la ley de Coulomb referida a las fuerzas existentes entre cargas eléctricas. El vector  $\vec{r}$  está dirigido desde  $p$  a  $p'$  cuando se trata de la fuerza ejercida por  $p$  sobre  $p'$  y va de  $p'$  a  $p$  cuando se trata de la fuerza ejercida por  $p'$  sobre  $p$ . La fuerza es positiva (de repulsión) cuando  $p$  y  $p'$  tienen el mismo signo y negativa (de atracción) en caso contrario.

En la ecuación [II.2] se ha elegido también una constante de la forma  $1/(4\pi K_m)$  (como en el caso de la ley electrostática de Coulomb); a fin de eliminar un factor  $4\pi$  que se presenta en casi todas las ecuaciones. La magnitud  $K_m$  se denomina, por analogía con la constante electrostática fundamental  $K_e$ , constante electrodinámica fundamental. El valor recíproco  $1/K_m = \mu_o$  es la llamada permeabilidad absoluta del vacío.

A primera vista, se puede pensar que en el Magnetismo aparece una propiedad verdaderamente nueva de la materia, y que la intensidad polar (o de momento magnético) tendría que considerarse como una 5ª magnitud fundamental. Sin embargo, todos los fenómenos magnéticos pueden reducirse a procesos eléctricos; por consiguiente, todas las magnitudes magnéticas pueden derivarse de magnitudes eléctricas y las unidades de aquellas deducirse de éstas. Pero, de momento, se tratará la intensidad de un polo como si fuese una nueva magnitud fundamental, y se definirá unidad de intensidad de polo, que se designará abreviadamente por 1 *po*. Ajustándose a las normas ordinarias, se define esta unidad en perfecta analogía con la definición de unidad de carga electrostática, sin violentar

el carácter provisional de la intensidad de polo como magnitud fundamental, imponiendo la condición de que el coeficiente  $K_m$  ha de tener el valor numérico, y que en lo demás habrá que hacer uso de las unidades del sistema CGS. Esto significa que un polo de 1 *po* de intensidad, ejerce la fuerza de una dina sobre otro igual situado a una distancia  $r = 1$  cm. De [II.2] se desprende:

$$K_m = \frac{1}{4\pi} po^2 \cdot dina^{-1} \cdot cm^{-2}, \text{ o sea, } \frac{1}{4\pi} po^2 \cdot erg^{-1} \cdot cm^{-1}$$

### 1.2.3.- CAMPO MAGNÉTICO. FLUJO MAGNÉTICO.

Puesto que en las inmediaciones de un polo magnético cualquiera otro polo experimenta una fuerza, se dice que en el espacio que rodea al primero existe un *campo magnético*. La propiedad característica de los cuerpos en dicho campo es la intensidad  $p$  del polo magnético, pues, según la fuerza depende dicha intensidad:  $f \sim p$ . Por lo tanto, se puede escribir:

$$\vec{f} = p \vec{B}, \quad \text{módulo } f = p B \text{ dinas.} \quad [\text{II.3}]$$

El vector  $\vec{B}$ , de módulo  $B$ , es la fuerza que la unidad de polo magnético positivo experimenta en el campo, o sea, conforme a la definición general del concepto de intensidad del campo,  $\vec{B}$  es la *intensidad del campo magnético* en los distintos puntos del espacio. Según [II.3], la fuerza ejercida sobre un polo positivo tiene la misma dirección que el campo, y la fuerza que actúa sobre un polo negativo tiene dirección opuesta.

Puesto que, según [II.3] es  $B = f/p$ , la unidad de intensidad de campo magnético en el sistema elegido será  $1 \text{ dina} \cdot 1 po^{-1} = 1 \text{ Gauss}(G)$ . Sin embargo, después de anexionar la intensidad polar al sistema eléctrico de unidades, se transforma la unidad de intensidad de campo de modo que la unidad de 1 *po* desaparezca.

Si en la ecuación [II.2] consideramos que  $p'$  es el polo positivo unidad, se deduce la siguiente expresión de la intensidad del campo magnético en las proximidades de un polo magnético aislado  $p$ :

$$\vec{B} = \frac{1}{K_m} \frac{p}{4\pi r^2} \frac{\vec{r}}{r}, \text{ módulo } B = \frac{1}{K_m} \frac{p}{4\pi r^2} \quad [\text{II.4}]$$

El vector  $\vec{r}$  se dirige desde el polo hacia el punto considerado. Si  $p$  es positivo, el vector  $\vec{B}$  va del polo hacia fuera, y si  $p$  es negativo, va en sentido contrario.

Así como en el campo eléctrico se han definido líneas de campo, también se pueden definir *líneas de campo magnético* en un campo magnético; son aquellas que en un punto presentan la dirección de dicho campo y cuya densidad representa la intensidad de éste. A través de cada  $\text{cm}^2$  de una superficie colocada perpendicularmente a la dirección de dicho campo (superficie equipotencial), pasan tantas líneas como indica la intensidad del campo en aquella región. Las *líneas magnéticas nunca empiezan o terminan en el espacio libre*. En un dipolo magnético aislado, las líneas magnéticas salen siempre del polo positivo y penetran por el negativo. Al contrario de lo que ocurre en los dipolos eléctricos, dichas líneas continúan por el interior desde el polo negativo al positivo, de modo que están cerradas, enunciando este hecho importante de la siguiente manera: *Las líneas de campo magnético son siempre cerradas*. Aunque en el espacio existan muchos dipolos, las líneas magnéticas se cierran siempre sobre sí mismas y no tienen principio ni fin. Este hecho constituye otra diferencia fundamental con relación a los campos eléctricos, cuyas líneas empiezan sobre cargas positivas y terminan sobre cargas negativas.

Se dice que un campo magnético es *homogéneo* cuando, dentro del dominio considerado, presenta en todas partes la misma intensidad y dirección. En este caso, las líneas de campo son rectas paralelas y equidistantes. Se tiene un campo aproximadamente homogéneo entre dos extremos de un imán en herradura, en las proximidades de los polos. En los demás puntos, los campos de un imán en herradura y de una varilla imantada son muy heterogéneos. Las líneas de campo son curvas y de densidad muy variable de un punto a otro.



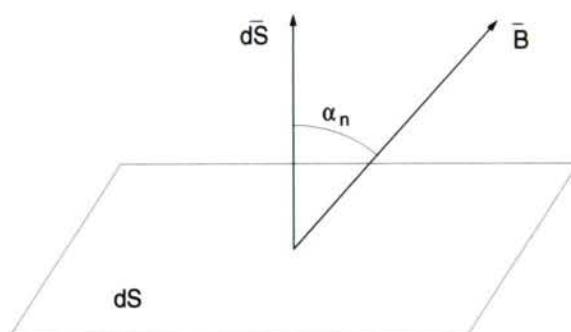


FIGURA II.1.- DEFINICIÓN DE FLUJO MAGNÉTICO

En la figura,  $dS$  representa un elemento de superficie situado en un campo magnético. De la misma manera que se define el flujo eléctrico, definiremos ahora el *flujo magnético*  $\Phi$  que atraviesa el elemento  $dS$  mediante la ecuación:

$$d\Phi = B ds \cos \alpha_n = \vec{B} d\vec{S} \quad [\text{II.5}]$$

y el flujo magnético que atraviesa una superficie finita, por medio de la igualdad:

$$\Phi = \int B dS \cos \alpha = \int \vec{B} d\vec{S}, \quad [\text{II.6}]$$

en donde la integral ha de extenderse a la superficie entera. Si el campo es homogéneo en toda ella y si se trata de una superficie plana y perpendicular a la dirección del campo, se tiene simplemente:

$$\Phi = B S. \quad [\text{II.7}]$$

La unidad de flujo magnético es  $1 \text{ gauss.cm}^2 = 1 \text{ maxwell}$ .

El flujo magnético que pasa a través de una superficie esférica  $S = 4\pi r^2$  trazada en torno a un supuesto polo magnético único es, en este caso,  $\cos \alpha_n = 1$  y puesto que, según

[II.4] en todos los puntos de la superficie es  $B = \frac{1}{K_m} \frac{P}{4\pi r^2}$ , se tiene,

$$\Phi = \frac{P}{4\pi K_m r^2} \cdot 4\pi r^2 = \frac{P}{K_m} \quad [\text{II.8}]$$

Luego el flujo magnético es independiente del radio de la superficie esférica. El valor numérico del flujo es igual al número de líneas de campo que atraviesan la superficie,

el cual es igual al de líneas que parten del polo  $p$ , ya que en el espacio éstas no nacen ni desaparecen. Con esto ha quedado demostrado que el número de líneas de campo que parten de un polo  $p$  es igual en valor numérico a  $p/K_m$ .

#### 1.2.4.- EXCITACIÓN MAGNÉTICA.

La analogía existente entre los fenómenos eléctricos y los magnéticos induce a definir en los campos magnéticos una magnitud análoga al desplazamiento eléctrico  $D$ , en forma de desplazamiento magnético. Así, las superficies polares planas y enfrentadas de un imán pueden considerarse que forma una especie de “condensador magnético” dotado de una “carga” magnética  $p$ , cuya densidad superficial sea

$$H = \frac{p}{S} \quad [\text{II.9}]$$

siendo  $S$  la superficie polar, de una manera parecida a como se escribe  $D = e/S$ .

La magnitud  $H$  no suele llamarse desplazamiento magnético, sino que siguiendo a *G. Mie*, se denomina excitación magnética. Como entre ambos polos existe un flujo magnético  $\Phi = p/K_m$  y puesto que  $\Phi = BS$ , teniendo en cuenta [II.9], se puede afirmar que en el vacío se cumple la expresión

$$H = K_m B. \quad [\text{II.10}]$$

Esta igualdad corresponde completamente a la relación  $D = K_e E$ , deduciendo de [II.9] la siguiente *unidad de excitación magnética*:

$$1 \text{ po. cm}^{-2}.$$

Si es  $d$  la distancia entre los polos,  $M = p d$  es el momento magnético de dipolo magnético constituido por éstos, y por lo tanto, se puede poner  $H = M/(Sd) = M/V$ , siendo  $V = Sd$  el volumen existente entre dos superficies polares.

Por consiguiente, la excitación magnética es idéntica al momento magnético relativo a la unidad de volumen del espacio ocupado por el campo, que es lo mismo que ocurre en

el caso del desplazamiento eléctrico. Es, pues, lógico considerar también que la excitación magnética es un vector  $\vec{H}$ , de módulo  $H$ , de igual dirección que el campo magnético.

Conforme a [II.10], se puede escribir vectorialmente:

$$\vec{H} = K_m \vec{B} \quad [\text{II.11}]$$

Lo mismo que en el desplazamiento eléctrico, la excitación magnética solo adquiere verdadero significado cuando se trata de campos magnéticos en los medios materiales.

La ecuación [II.11] ya no se refiere para nada a las superficies polares consideradas primeramente, y es aplicable a todo punto de un campo magnético cualquiera, definiendo en dicho punto un vector  $\vec{H}$  (excitación magnética) de igual dirección que el vector de intensidad de campo.

### 1.2.5.- FUERZAS EJERCIDAS POR LOS CAMPOS MAGNÉTICOS SOBRE DIPOLOS.

En un campo homogéneo, sobre un dipolo magnético actúa un momento de giro:

$$\vec{N} = [\vec{M}\vec{B}], \quad \text{módulo } N = -MB \sin \varphi \quad [\text{II.12}]$$

siendo  $\varphi$  el ángulo formado por el momento magnético  $\vec{M}$  del dipolo y la dirección del campo  $\vec{B}$ . Si se trata de un ángulo agudo  $\varphi$  tan pequeño que pueda considerarse  $\sin \varphi \approx \varphi$ , se tiene:

$$N = -MB\varphi = -D\varphi, \quad [\text{II.13}]$$

siendo  $D = MB$

Según esto,  $D = MB$  es el momento director del dipolo en el campo  $\vec{B}$ . Si se conoce el momento magnético  $\vec{M}$  y el momento de inercia  $\vec{J}$  de un imán, es posible calcular la intensidad del campo magnético a partir del periodo de oscilación

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{J}{D}} = 2\pi \sqrt{\frac{J}{MB}} \quad [\text{II.14}]$$

Un dipolo magnético colocado previamente en la dirección de un campo homogéneo, experimenta una fuerza  $f$  que tiende a arrastrarlo en la dirección de los campos crecientes:

$$f = M \frac{dB}{dx} \quad [\text{II.15}]$$

Se observa que lo que es decisivo para el momento de giro y para la fuerza que actúa sobre un dipolo, no es precisamente la intensidad polar, sino el momento magnético; esto se corresponde al hecho de que no existen polos aislados, sino únicamente dipolos magnéticos. [WEST-51: 441/449]

#### 1.2.6.- MOMENTO DIRECTOR DE UNA AGUJA MAGNÉTICA.

La aguja náutica, suspendida por encima del centro de gravedad, queda sometida solamente a la acción de la componente horizontal del magnetismo terrestre,  $H$ , pudiendo girar libremente en el plano horizontal hasta alcanzar la posición de reposo.

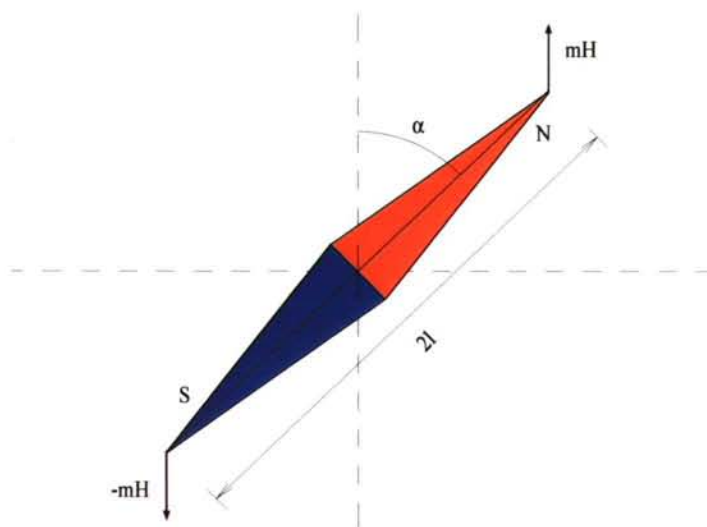


FIGURA II.2.- MOMENTO DIRECTOR

Cuando se separa la aguja de su posición de equilibrio un determinado ángulo, sobre cada polo actúa una fuerza  $mH$ , siendo  $m$  la intensidad del polo. Las fuerzas  $mH$  y  $-mH$  forman el par director o giratorio, cuya expresión es:



$$M_d = mH \cdot 2l \sin \alpha$$

En contra de este par director actúa el par resistente ocasionado por el rozamiento del chapitel y el estilo; después de una serie de oscilaciones la aguja quedará en reposo; el periodo de oscilación de la aguja es:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{M \cdot H}} \quad [II.16]$$

con:

M: momento magnético del imán. ( $2lm$ )

I: momento de inercia.

La aguja debe de cumplir dos propiedades: sensibilidad y estabilidad.

### *Sensibilidad*

La sensibilidad, o propiedad de acusar un cambio de rumbo por pequeño que sea, se cuantifica en el instante en que el momento director se iguala con el momento resistente, quedando la aguja en reposo formando un ángulo  $\beta$  con el meridiano magnético que no debe de superar un valor superior a  $\frac{1}{4}$  de grado.

El valor del momento resistente responde, al igual que el momento director a la expresión:

$$M_r = mH \cdot 2l \cdot \sin \beta$$

de donde:

$$\sin \beta = \frac{M_r}{mH \cdot 2l} \quad [II.17]$$

Para disminuir el valor de  $\beta$  se puede actuar sobre  $M_r$  disminuyendo el rozamiento del chapitel sobre el estilo o sobre el valor  $2lm$  aumentándolo hasta el valor máximo que permita un periodo de oscilación apropiado.

La disminución de la presión del chapitel sobre el estilo se logra mediante dos vías: la primera consistente en disminuir el rozamiento entre ambos elementos utilizando



elementos de fabricación apropiados; para el chapitel se emplean piedras muy duras, como el ágata y el zafiro, y para el estilo (bien afilado) aleaciones de metal muy duro.

La segunda vía de actuación consiste en diseñar un flotador de tal modo que la presión del chapitel sobre el estilo quede reducida a valores comprendidos entre 7 y 13 gramos. No conviene disminuir la presión por debajo de los 7 gramos pues se corre el peligro de salirse el chapitel con los pantocazos del buque.

Es necesario reseñar que el diámetro del mortero debe de ser claramente mayor que el diámetro de la rosa con el fin de evitar el momento de adherencia entre el mortero, líquido y rosa durante los cambios bruscos de rumbo.

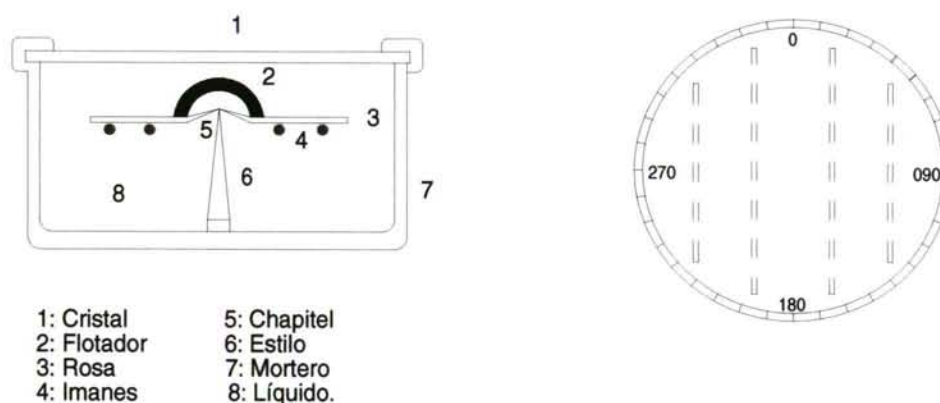


FIGURA II.3.- AGUJA NÁUTICA [GONZ-82: 259]

En cuanto al momento magnético, se puede aumentar éste mediante el empleo de imanes de aleaciones de níquel, cobalto y aluminio, que consiguen un alto nivel magnético. Los imanes se colocan en haces simétricos a 30° y 45° a banda y banda del eje de la rosa. También se puede emplear un único imán anular. El mayor peso de estos elementos no implica ningún inconveniente ya que queda absorbido por el flotador.

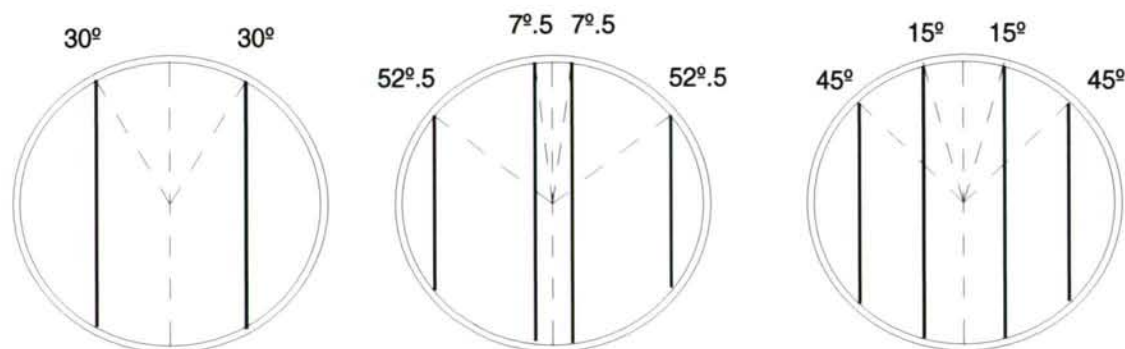


FIGURA II.4.- HACES 30° Y 45° [MART-57:117]

### Estabilidad

La estabilidad puede considerarse desde dos aspectos: la estabilidad magnética y la estabilidad mecánica.

La estabilidad magnética tiene como consecuencia el periodo de oscilación de la aguja:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{M \cdot H}}$$

con:

I: inercia.

M: momento magnético.

H: componente horizontal del magnetismo terrestre.

El valor del periodo de oscilación proyectado para las agujas náuticas suele ser, como mínimo, de 20 segundos. La razón de estos valores viene determinado por los periodos de balance de los buques, normalmente menores del valor referido, que podrían entrar en oscilación con los de la aguja náutica y, como consecuencia, hacer inviable el gobierno de la embarcación.

Para conseguir un valor alto del periodo se puede actuar sobre el valor del momento de inercia  $I$ , o bien disminuir el momento magnético  $M$ .

El momento magnético no se debe disminuir porque implicaría una pérdida de sensibilidad en la aguja, por lo que se actúa aumentando el momento de inercia, para lo cual se aumenta la masa o la distancia. En el caso de agujas líquidas esto no constituye problema pues el aumento de peso y, por consiguiente, el rozamiento entre el chapitel y el estilo, queda compensado con un aumento del flotador. No obstante, en las agujas secas esto no es posible por lo que se incorpora un aro de inercia de gran radio y poca masa.

La estabilidad mecánica se optimiza bajo las siguientes condiciones:

1. Centro de giro y suspensión coincidentes.
2. Momento de inercia grande.
3. Igual en todos los sentidos.[RIBE-61: 41/45]

El centro de giro y suspensión no pueden ser coincidentes ya que se necesita contrarrestar la componente vertical del magnetismo terrestre,  $Z$ , por lo que se intentará aproximarlos lo más posible siempre que se asegure la horizontalidad de la aguja.

La segunda condición ya quedó expuesta en la estabilidad magnética, así como la tercera según la figura [II.4].

Para calcular las características de una aguja, las referencias en la práctica se obtienen a partir de los valores de la semioscilación y de la sensibilidad.

Para el cálculo de la semioscilación, se desvía la aguja mediante un imán unos  $35^\circ$  aproximadamente, separando acto seguido el imán para que la aguja quede en libertad y vuelva a la posición de equilibrio. Cuando la marcación de la rosa correspondiente a la posición de equilibrio pase por la línea de fe, se pone en marcha el cronógrafo y se mide el tiempo que tarda la aguja en dar una oscilación completa. La mitad de ese intervalo es el valor de la semioscilación. Valores apropiados, según la “Deutsche Seewarte” son los siguientes [MART-58:115]:

Clase de aguja	Ø de la rosa	Duración en segundos
Seca	150	11
	170	14
	200	16
	225	17
	255	18
De líquido	100	11
	150	16.5
	175	19
	200	22
	230	26

Por otro lado, las semioscilaciones deben de amortiguarse de una forma regular, en razón aproximada de 3 a 1 en las de líquido.

Para comprobar la sensibilidad, se separa la aguja de su posición de reposo un ángulo pequeño, aproximadamente  $3^\circ$ , mediante un imán que se retirará rápidamente para que la aguja recobre su posición de equilibrio. Una vez en reposo se anota el rumbo señalado en la línea de fe y se repite la operación a la otra banda. La diferencia entre las dos lecturas es el ángulo  $2\beta$ . El máximo valor tolerable para  $\beta$  es de  $0^\circ,25$ .

### **1.2.7.- ACCIÓN DE LOS POLOS DE UN IMÁN CORRECTOR SOBRE LOS POLOS DE LA AGUJA NÁUTICA**

Un polo magnético ejerce sobre otro una fuerza de atracción o repulsión directamente proporcional a sus intensidades e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ambos:

$$F = \frac{m \cdot m'}{d^2}$$



Si expresamos  $m$  y  $m'$  en gauss, y  $d$  en centímetros,  $F$  vendrá en dinas.

Se plantea el estudio anterior sobre la influencia de los dos polos de un imán sobre un polo unidad aislado, en el supuesto de que la distancia entre el centro del imán y el polo sea lo suficientemente grande comparada con la longitud del imán, y se consideran dos casos:

- 1- El polo aislado en la prolongación del eje del imán.
- 2- El polo aislado en la perpendicular al imán sobre su punto medio.

En el primer caso, llamando  $2l$  a la longitud del imán y  $m$  a la intensidad de su polo,  $n$  el polo aislado y  $d$  la distancia entre centros, la fuerza ejercida por el polo rojo (N) del imán es:

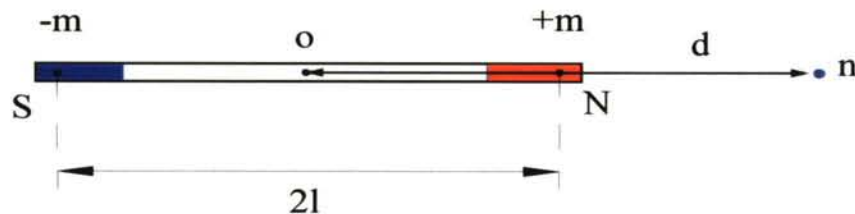


FIGURA II.5.- POLO AISLADO EN LA PROLONGACIÓN DEL EJE

$$f = \frac{m}{(d-l)^2}$$

y la ejercida por el polo azul (S)

$$f' = -\frac{m}{(d+l)^2}$$

La resultante de ambas será, por lo tanto:

$$F = \frac{m}{(d-l)^2} - \frac{m}{(d+l)^2} = \frac{4mld}{(d^2-l^2)^2} = \frac{4mld}{[d^2(1-\frac{l^2}{d^2})]^2} = \frac{4mld}{d^4(1-\frac{l^2}{d^2})^2}$$

Sustituyendo la expresión  $2lm$  por  $M$  y despreciando el cociente  $\frac{l^2}{d^2}$ , queda:



$$F = \frac{2M}{d^3} \quad [\text{II.18}]$$

El segundo supuesto, polo aislado  $n$  situado sobre la perpendicular al imán en su punto medio, las fuerzas auténticas tendrán por expresión:

$$f = \frac{m}{(Nm)^2} \quad \text{y} \quad f' = \frac{m}{(Sm)^2}$$

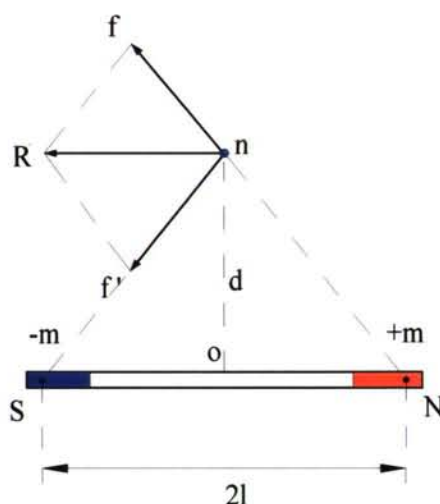


FIGURA II.6.- POLO AISLADO EN LA PERPENDICULAR AL IMÁN

Y la resultante,  $R$ , paralela al imán  $NS$ , siendo los triángulos  $nfR$  y  $NnS$  semejantes, se puede expresar:

$$\frac{R}{f} = \frac{2l}{n.N} \quad ; \quad R = \frac{f \cdot 2l}{n.N} = \frac{2l.m}{(n.N)^3}$$

sustituyendo:

$$R = \frac{M}{(d^2 + l^2)^{\frac{3}{2}}} = \frac{M}{[d^2(1 + \frac{l^2}{d^2})]^{\frac{3}{2}}} = \frac{M}{d^3(1 + \frac{l^2}{d^2})^{\frac{3}{2}}}$$

despreciando el término  $\frac{l^2}{d^2}$ , queda:

$$R = \frac{M}{d^3} \quad [\text{II.19}]$$

Las fórmulas [II.18] y [II.19] deducen la propiedad fundamental de la colocación de los correctores para anular los desvíos cuadrantales en el sentido de que *“la fuerza ejercida por un imán cuando está en línea con el polo, es doble a la ejercida cuando el polo se encuentra situado sobre la perpendicular al imán en su punto medio”* [SUBS-72]

### 1.3.- EL CAMPO MAGNETICO TERRESTRE

Las primeras investigaciones sobre el campo magnético terrestre datan de 1.600, cuando William Gilbert publicó *De Magnete*. Un siglo después, Edmund Halley peinó el océano Atlántico en un extraordinario esfuerzo para obtener la carta de declinaciones magnéticas. (Llábase declinación magnética al ángulo que forma el norte geográfico con el norte magnético). Otros grandes exploradores, como James Cook y James Ross, tomaron también cuenta detallada de la declinación magnética.

Durante los últimos dos siglos los investigadores han ido mejorando progresivamente la calidad y cantidad de mediciones del campo magnético terrestre y han establecido observatorios geomagnéticos por todo el globo terráqueo. Ese empeño medidor culminó en 1.980 cuando se lanzó al espacio el satélite MAGSAT. Este proyecto de un año de duración ha proporcionado cuantiosos datos de alta calidad. Un mapa basado en mediciones realizadas en 1.980 revela que el campo geomagnético en la superficie del núcleo terrestre, comparte algunas características con el campo dipolar, con una intensidad media del orden de 0,5 G. ( $1 \text{ G} = 10^{-4} \text{ T}$ ) [LAND-97: 633]. El mapa fundamentalmente azul en hemisferio Norte y rojo en el hemisferio Sur. Además, el ecuador magnético, o curva ecuatorial de flujo nulo, se encuentra cerca del Ecuador geográfico.

También en 1.980, uno de los autores (Gubbins) empezó a recopilar y analizar registros del campo magnético de fuentes históricas y contemporáneas. Poco después, Kathy A. Whaler, Ken A. Hutcheson, Andrew Jackson y otro autor (Bloxham) se integraron en el proyecto. David R. Barraclough, del Servicio Geológico Británico, y Robert A. Langel, del centro de Vuelos de la Administración Nacional de la Aeronáutica y el Espacio (NASA), aportaron una información de inestimable valor sobre las fuentes de datos. Las primeras etapas del proyecto proporcionaron un registro, de 380 años, del campo magnético sobre la superficie terrestre [BLOX-97:20/21].

Los mapas revelaron características y rasgos bien conocidos del campo. Este es similar al que produciría una enorme barra imantada y alineada con el eje de rotación de la Tierra, o equivalente a una descomunal corriente eléctrica alrededor del Ecuador. Este

campo tiene dos polos en donde su magnitud es mayor; es, pues, un campo dipolar [VALE-97:941].

El campo magnético puede representarse por medio de líneas de fuerza magnética. Estas líneas describen trayectorias curvas, la mayoría de las cuales emergen en las proximidades del polo Sur y entran en los alrededores del polo Norte. La tangente a una línea de campo indica la dirección de la fuerza magnética: la densidad de las líneas señala la intensidad del campo magnético.

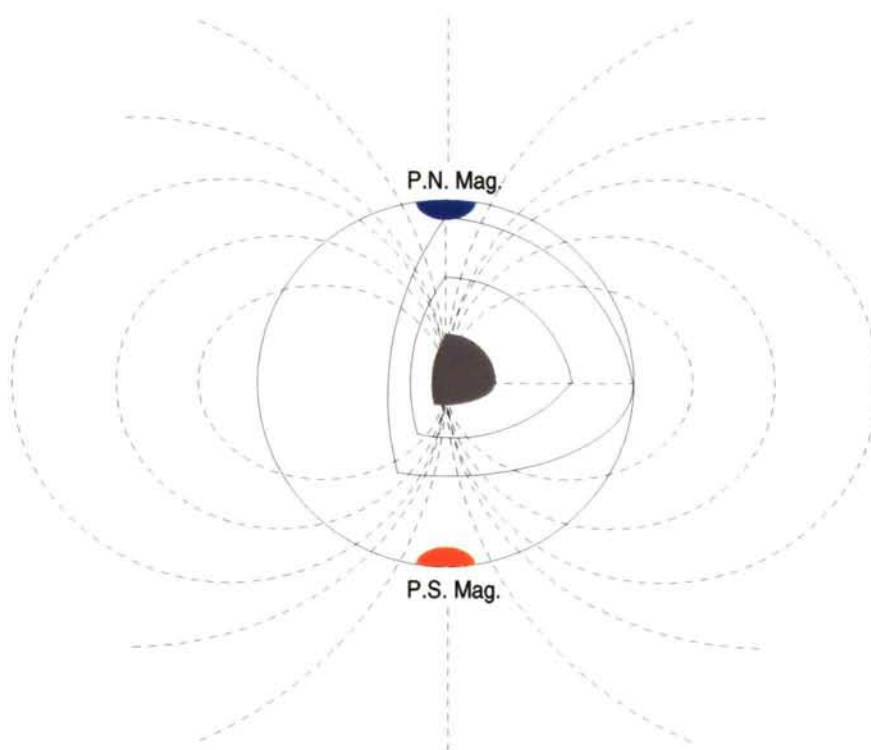


FIGURA II.7. LINEAS DE FUERZA DEL CAMPO MAGNETICO TERRESTRE.

El centro del dipolo magnético sería coincidente con el centro de la Tierra y el eje estaría inclinado  $11^{\circ},5$  con el eje de rotación. Por este motivo los polos magnéticos no se corresponden con los polos geográficos: la posición de los polos magnéticos es variable con el tiempo.



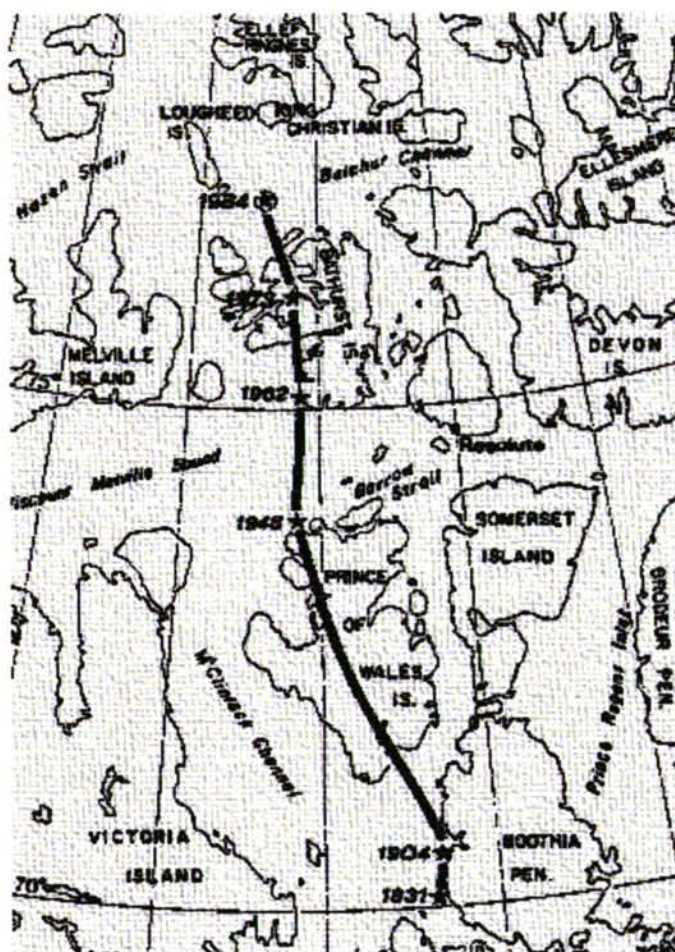


FIGURA II.8.- MOVIMIENTO SECULAR DEL POLO N. MAG. [TALS-97:2]

Así, el polo Norte Magnético se ha movido unos 750 Km. desde el año 1.904, con una velocidad media de 9,4 Km/año. No obstante, en las últimas décadas la velocidad promedio aumentó a 11,6 Km/año [NEWI-86:1062].

Las posiciones de los polos se pueden ubicar en la actualidad de la siguiente manera: el Polo Norte Magnético en las cercanías de la Isla de Bathurst ( $78^{\circ}$  N,  $102^{\circ}$  W) en el archipiélago ártico canadiense y el Polo Sur Magnético a lo largo de la costa del Mar de Urville ( $78^{\circ}$  S,  $110^{\circ}$  E) [VIAL-00: <http>] .



### 1.3.1.- MODELO APLICADO DE CAMPO MAGNETICO TERRESTRE

Con independencia de su complejidad, en el estudio del comportamiento de la aguja náutica todos los autores se inclinan por considerar a la Tierra como un dipolo que crea un campo magnético que la rodea con los dos polos ya citados. Las líneas de fuerza salen del polo rojo, atravesando la corteza terrestre en las proximidades del polo magnético sur y después de envolver la esfera terrestre penetran en su interior en las proximidades del polo azul o norte. En cada punto de la tierra, la línea de fuerza que va de polo a polo es la que orienta a la aguja magnética suspendida libremente. Las líneas de fuerza (o flujo) del campo magnético terrestre forman un ángulo respecto a la horizontal que varía con la latitud, recibiendo el nombre de inclinación magnética,  $\theta$ , magnitud medida ya en el año 1.576 por el inglés Robert Norman mediante la primera brújula de inclinación o inclinómetro magnético [PHYS:http]

La necesidad de situar la aguja magnética en el plano horizontal, obliga a descomponer la citada fuerza  $F$  en dos componentes, la horizontal  $H$  y la vertical  $Z$ .

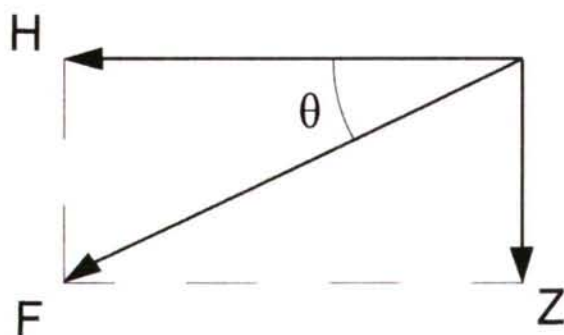


FIGURA II.9.- COMPONENTES DEL MAGNETISMO TERRESTRE

Tal como se deduce de la figura:

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{Z}{H} \quad [\text{II.20}]$$

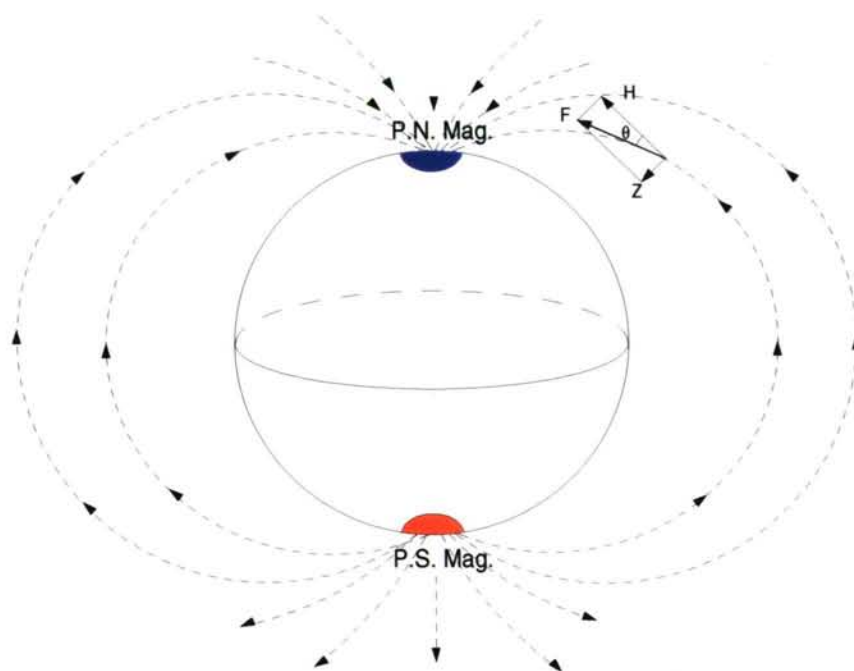


FIGURA II.10.- MODELO DE CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE

La componente horizontal,  $H$ , sigue la dirección del meridiano magnético, mientras que la componente vertical  $Z$ , será hacia arriba en el Hemisferio Sur magnético y hacia abajo en el Hemisferio Norte Magnético.

Se da el signo positivo a la inclinación magnética  $\theta$ , hacia abajo por lo que  $Z$  tendrá el mismo signo. Obviamente, en el Ecuador magnético  $F = H$  y en los polos magnéticos  $F = Z$ .

Tal como se indicó, la componente horizontal,  $H$ , sigue el meridiano magnético, pero este meridiano no es un círculo máximo tal como se asimilaría por similitud con los meridianos geográficos, sino que su trayectoria sufre variaciones formando en cada punto de la superficie terrestre un ángulo con el meridiano geográfico denominado declinación magnética (o variación local en la terminología náutica), que se considera positiva o NE cuando el norte magnético queda a la derecha del norte verdadero y negativa o NW en el caso contrario. Las líneas que unen los puntos de igual declinación magnética se denominan

isogónicas, recibiendo el nombre particular de agónicas las que unen los puntos de declinación cero.

Del mismo modo, las líneas que unen los puntos de igual inclinación magnética toman el nombre de líneas isóclinas. Son habituales las representaciones cartográficas tanto de las líneas isogónicas como de las isóclinas.

#### **1.3.1.1.- VARIACIONES DEL CAMPO MAGNETICO TERRESTRE.**

Aunque el estudio de este campo se remonta al siglo XVI con los trabajos de W. Gilbert, fue solo en el siglo XIX cuando el geomagnetismo cobró un verdadero auge con la descripción matemática formulada por Gauss, la apertura de las primeras observaciones magnéticas y el inicio del primer programa de cooperación científica internacional, destinado a mejorar el conocimiento del campo magnético del globo [VALE-97:940].

Desde hace mas de un siglo los geofísicos vienen observando un constante y significativo debilitamiento de la intensidad del campo magnético terrestre. Si esta tendencia continuase al ritmo actual, el campo se anularía en tan solo 1.500 años. La mayoría de los investigadores se inclina a pensar que la disminución es tan solo un aspecto más de la variabilidad inherente al campo, y que éste recuperará su intensidad. Aun así, no se puede descartar la posibilidad de que el debilitamiento presagie un fenómeno que ya ha ocurrido varias veces a lo largo de los tiempos geológicos: la inversión del campo geomagnético. Goza hoy la amplia aceptación la idea según la cual el movimiento de electrones libres en el núcleo externo en convección engendra el campo magnético terrestre. Esta teoría supone que el núcleo se comporta como una dinamo permanente, un dispositivo que convierte energía mecánica en energía magnética. En la dinamo terrestre, la rotación del planeta, junto con los efectos gravitatorios y termodinámicos en el núcleo y a su alrededor, son los causantes de los movimientos del fluido que producen los campos magnéticos [CARR-79: 36].

Aunque los principios básicos del funcionamiento de la dinamo están bien asentados, los geofísicos todavía no conocen la termodinámica, mecánica de fluidos y propiedades eléctricas del interior de la Tierra con la profundidad suficiente para construir un modelo correcto de la dinamo terrestre. Ello no obsta para que los efectos de su



actuación puedan vislumbrarse de manera indirecta mediante la observación del campo existente en la actualidad. Estas mediciones proporcionan muchos detalles sobre el comportamiento del campo a corto plazo, tales como su morfología y "variación secular", o fluctuación ordinaria. Para estudiar la actividad de la dinamo a lo largo de años hay que recurrir al archivo paleomagnético: el antiguo magnetismo "congelado" en las rocas en el momento de su formación.

La sindicaciones paleomagnéticas condujeron, en 1.906, al físico francés Bernard Brunhes a sugerir la inversión del campo magnético terrestre. Brunhes quedó intrigado por el descubrimiento de rocas que estaban magnéticamente orientadas en sentido opuesto al campo magnético terrestre. Su sorprendente sugerencia fue objeto de acalorados debates por más de cinco decenios, la mayor parte de la comunidad científica no aceptó la idea hasta principios de la década de 1.960, cuando J.S.B. Van Zijl y sus colaboradores publicaron un estudio minucioso de una inversión del campo registrada paleomagnéticamente en lavas sudafricanas. Hoy día se ha convertido en un principio fundamental de geofísica que el campo magnético terrestre puede tomar cualquiera de los dos estados de polaridad: el estado "normal", en el cual las agujas magnéticas que apuntan al Norte se dirigen hacia el Norte geográfico, y el estado "invertido", en el cual están dirigidas hacia el Sur geográfico.

En el decenio de 1.960, los estudios de lavas cuyas edades se determinaron radiométricamente dieron por resultado un catalogo seguro de cambios de polaridad ocurridos en el pasado, entre los que se contaban no menos de nueve inversiones importantes en los últimos 3,6 millones de años, la postrera de las cuales había tenido lugar hace 730.000 años. La escala de tiempo de los cambios de polaridad se ha alargado hacia atrás desde entonces hasta llegar casi a los 170 millones de años.

Los archivos paleomegnéticos muestran que el campo geomagnético no se invierte instantáneamente al pasar de un estado de polaridad a otro. Antes bien, comporta un período de transición que abarca algunos miles de años. De aquí que, durante quizás el 98 por ciento del tiempo, el campo se mantenga estable con una configuración justificable. Pero durante el dos por ciento restante, el campo es inestable y su estructura no resulta fácil de entender [HOFF.-95: 40].





## **2.- MAGNETISMO DEL BUQUE**



## 2.1.- CLASIFICACION DE LOS HIERROS A BORDO.

Los buques están contruidos con hierros de diversa índole, que van desde los los hierros dulces que apenas contienen acero en su composición (hasta un 0,2%) a los aceros medios, con un contenido en carbono del orden de los 0,6% [BABO-65:807].

La madera, como material fundamental usado en la construcción de buques a lo largo de la historia, comenzó su ocaso como consecuencia de la escasez en los países punteros en la construcción naval, (España, Reino Unido, Holanda) comenzaron a notar la falta de materia prima, así como el incremento en los costes de producción. Los primeros buques contruidos en hierro fueron el Aaron Mambi y el Vulcan, que salieron de los astilleros escoceses sobre el año 1.819; en principio los buques contruidos rara vez superaban las 500 toneladas de carga, apareciendo las primeras conclusiones favorables a la utilización del hierro frente a la madera, pese a ser un material mucho más pesado, el hierro permitía reducir el peso del buque en rosca, aproximadamente, de un 20% al 40% en relación con uno contruido en madera. En menos de cuarenta años, los buques de hierro pasaron de menos de cien metros de eslora a los doscientos cinco metros de eslora del Great Estern.

El Lloyds Register fue la sociedad de clasificación que publicó las primeras reglas para la construcción de buques metálicos. El descubrimiento por Henry Bessemer, de la fabricación del acero, facilitó la progresiva utilización de esta aleación en la construcción naval, permitiendo un decremento importante en los escantillones, por las mejores características mecánicas y la mayor resistencia de esta aleación frente a los materiales de hierro utilizados en los comienzos; curiosamente, en el mundo naval, los barcos contruidos durante los años sesenta del siglo XIX, se consideraban como construcciones de acero experimentales.

La introducción del horno abierto en el año 1.873, por William Siemens, da origen a un método de producción que lleva su nombre, y además con él se consigue un acero de las mejores calidades para su uso en la construcción naval. A finales del siglo XIX, ya se establecieron los métodos para realizar las pruebas de los distintos tipos de acero que se podían emplear, así como sus características mecánicas.



En los comienzos del siglo XX, aparecieron un numero elevado de fallos en los aceros utilizados, lo que originó un amplio estudio de los procesos de fabricación, así como su composición química.

Hasta el final de la Segunda Guerra Mundial, las características de los aceros utilizados en la construcción naval, apenas sufrieron cambios, no existía una norma rigurosa en cuanto a su composición y los márgenes de aleación se movía alrededor de los siguientes valores.

C	Mn	Si	P	S
0,20%	0,75%	0,15%	0,05%	0,05%

La utilización masiva de la soldadura eléctrica, durante el periodo de guerra, para facilitar la construcción de buques tan necesaria en esos momentos, permitió fijar los porcentajes de C y Mn a fin de optimizar la soldadura en los distintos elementos, con objeto de evitar que aceros con un buen comportamiento desde el punto de vista de su ductilidad, los cuales al ser soldados presentaban fallos que originaban roturas frágiles en condiciones de mala mar y a bajas temperaturas. Para resolver este problema en la construcción naval, se crearon comités de expertos en Norteamérica y Reino Unido, que se encargaron de realizar los trabajos de investigación para evitar los problemas de roturas y grietas que aparecían en las diferentes zonas soldadas.

Las primeras conclusiones consistieron en:

- Controlar la calidad de los cordones de soldadura.
- Modificar las zonas de unión, evitando la soldadura en ángulo.
- Colocar refuerzos en los límites de las aberturas
- Mejorar la tenacidad del acero.

Las sociedades de clasificación American Bureau of Shipping (A.B.S.A.) y el Lloyds Registers, (L.R.) fueron las primeras en utilizar hasta tres tipos de aceros diferentes para su utilización en función de los espesores (bajos, medios y elevados), dependiendo de las necesidades estructurales.

Hasta mediados del año 1.959, cada sociedad de clasificación utilizaba sus propias reglas para la utilización de los aceros, en función de sus experiencias en materia de fragilidad. Después de varias reuniones, las siete Sociedades de Clasificación más importantes, L.R., B.V. G.L., A.B.S., R.I.N.A., N.V. y N.K.K., llegaron a un acuerdo unificando los criterios con respecto a la composición del acero dulce utilizado en la construcción naval, que hasta esa fecha permitía el empleo de mas de 20 clases distintas de acero. Todas ellas se redujeron a cinco, denominándose desde entonces con las letras A, B, C, D y E.

Actualmente la calidad de acero conocida como grado C, ha sido retirada, quedando las clases siguientes de aceros, con la composición química especificada en la tabla adjunta:

TABLA 1 ACEROS DE CONSTRUCCION NAVAL DE RESISTENCIA NORMAL

GRADO DE CALIDAD		A	B	D	E
%	C máx.	0,23	0,21	0,21	0,18
%	Mn	2,5	0,8	0,6-1,4	0,7-1,5
%	Si	0,35	0,35	0,10-0,35	0,10-0,35
%	P máx.	0,04	0,04	0,04	0,04
%	S máx.	0,04	0,04	0,04	0,04
%	Al mín.	-	-	0,02	0,02

La necesidad de encontrar materiales más resistentes para su utilización en la construcción naval, como consecuencia del incremento de tamaño de los buques y para aligerar su peso, en el Reino Unido y en Alemania se trabajó en aleaciones de hierro con Manganeso y Cromo Níquel respectivamente. En ambos casos, los aceros conseguidos mejoraban las características mecánicas de los aceros dulces que se utilizaban normalmente, apareciendo en el mercado los aceros de alta resistencia, cuyo uso en la

actualidad es muy frecuente, sobre todo en las zonas mas comprometidas en lo que respecta a la resistencia estructural del buque.

Dentro de las aleaciones de hierro utilizadas en la construcción naval, el acero es la más importante; el elevado uso del mismo no sólo se debe a sus excelentes propiedades, sino a la existencia de muchos yacimientos de minerales de hierro y a su fácil procedimiento de fabricación. Al ser maleables y plásticos a elevadas temperaturas, se pueden modificar sus formas y dimensiones con métodos como el laminado, lo que nos permite formar las chapas con espesores diferentes, necesarios para la fabricación de las distintas piezas del casco de un buque. Si a este sistema de fabricación de planchas le añadimos la facilidad de unión entre ellas a elevadas temperaturas, mediante el proceso de soldadura, podemos decir que no existe otro mas adecuado para su utilización en la construcción de grandes buques.

Hoy en día existen muchos tipos de aceros con diferentes composiciones y propiedades, dependiendo de sus características y de los tratamientos térmicos a los que son sometidos.

En la actualidad, son las sociedades de clasificación las que determinan las distintas calidades de los materiales a emplear en la construcción naval.

Para el Germanische Lloyds, los aceros y materiales férreos, que se pueden utilizar son:

A- Aceros laminados en chapas, perfiles, barras y tubos.

B- Aceros forjados

C- Materiales fundidos

*Aceros laminados.*- Los aceros laminados se fabrican en hornos Martin-Siemens o bien en hornos eléctricos mediante el procedimiento de soplado de oxígeno.

Todos los aceros empleados en la construcción naval, al tratarse de productos laminados, deben de poseer una buena aptitud al corte, ya que la mayoría de las planchas utilizadas deben de ajustarse a formas determinadas. Según la traca de montaje, no deben de ser frágiles y deben de ser resistentes y tenaces para soportar los esfuerzos a que se



ven sometidos durante los diferentes estados de carga, así como en situaciones extremas de mal tiempo.

Como norma general, la calidad A se emplea en espesores de 12,5 mm. o menos. Para espesores mayores de 25 mm. se usa la calidad C. De todas formas, los Reglamentos de las Sociedades de Clasificación determinan la calidad de acero a utilizar según escantillones, tipo de buque, eslora del mismo y zona que corresponda dentro de cada barco.

*El acero forjado.*- Las piezas de acero forjado se obtienen machacando con martillo o con prensa un tocho de acero dulce al rojo blanco. Con este tratamiento se consigue un material con mayor resistencia y tenacidad.

El acero forjado va cediendo terreno en la construcción naval al acero fundido, aunque para piezas pequeñas y sencillas no parece aconsejable hacer un molde para fundirlas.

El acero forjado rompe antes que el fundido o moldeado, pero tiene mayor alargamiento, mejor plegado y una estructura interna más homogénea y de mayor garantía.

*El acero fundido.*- Los elementos principales en que se utiliza el acero fundido son: núcleos de codaste y timón, talones de codaste, soportes de timón, anclas, escobenes, bitas, guiacabos, etc. Las piezas fundidas deben someterse a un recocido de normalización a una temperatura de 850° a 900° C. La carga de rotura es de 41 a 45 kg/mm<sup>2</sup>. El plegado se hará a 120° con un radio interior de 25 mm. no debiendo aparecer grietas. El porcentaje de carbono será inferior al 0,23 % y el de azufre y fósforo al 0,05 %.

*Aceros de alta resistencia.*- Después de la Segunda Guerra Mundial comenzó a utilizarse el acero de alta resistencia en los buques de la marina mercante. Actualmente el uso se hace cada vez más frecuente.

Las aplicaciones del acero de alta resistencia son las siguientes: depósitos para buques de transporte de gas licuado, mástiles para izado de grandes cargas, mechas de timones, etc. así como diversas zonas del casco de grandes petroleros, bulk-carrier, buques portacontenedores, frigoríficos y trasatlánticos.



En los superpetroleros de más de 150.000 T.P.M. las razones para utilizar acero de alta resistencia son: reducir el peso del casco, conseguir más capacidad de carga, reducir (en determinadas zonas de cubierta y fondo) los escantillones a “espesores razonables” que eliminan problemas de soldadura. En general los elementos que se hacen con acero de alta resistencia quedan localizados en una zona alta (cinta, trancanil, planchas de cubierta, longitudinales de cubierta y parte alta de mamparos longitudinales) y una zona baja (quilla, fondo, pantoque, parte baja de mamparos longitudinales correspondientes a las planchas mencionadas. La zona considerada se extiende en un 40 a un 50 % de la eslora central.

En los bulk-carrier de más de 30.000 T.P.M. se utiliza el acero de alta resistencia para las planchas de cubierta y longitudinales de la misma. En buques de más de 70.000 T.P.M. se suele construir además el fondo con sus longitudinales.

En los buques para el transporte de contenedores de más de 120 m. de eslora es aconsejable el acero de alta resistencia para la cubierta superior pues ésta se encuentra muy debilitada por la profusión de escotillas que posee.

*Acero en perfiles.*- Para la construcción de cuadernas, baos, y refuerzos en general, se emplean perfiles laminados. Para pequeños escantillones se emplean ángulos de lados iguales o desiguales, perfiles de bulbo, etc.

Las esloras, los baos reforzados longitudinales de superpetroleros, etc. cuyas dimensiones son superiores a las existentes en el mercado, se fabrican a base de planchas afaldilladas, con llanta de cara formando «L» o «T».

Las características mecánicas y de composición química de los perfiles son similares a las del acero laminado en planchas.

*Aceros especiales.*- En el transporte de gases licuados como nitrógeno, oxígeno, metano (gas natural), argón, propano, etileno, etc. se requieren bajas temperaturas para mantener el estado líquido de los gases, lo que obliga a utilizar aceros especiales que reúnan las características mecánicas necesarias a dichas temperaturas.

Entre los materiales especiales para usos criogénicos, tenemos el acero al 9 % de níquel, aleaciones de aluminio y el acero inoxidable, como más importantes.

El acero al 9 % de níquel presenta unas buenas características mecánicas y resistencia a la fractura frágil, incluso a temperaturas de  $-200^{\circ}\text{C}$ .

Para buques que transporten o manejen materiales abrasivos tales como carbón, mineral, arena de dragados, etc. la resistencia al desgaste del acero adquiere mucha importancia. Para estos propósitos se utilizan aceros al carbono, manganeso, silicio, con los que se obtienen durezas del orden de 240 Brinell. Estos aceros suelen ser soldables mediante técnicas especiales de precalentamiento y electrodos de bajo contenido en hidrógeno.

Cuando se trate del transporte de cargas químicas que ataquen el acero, es preciso acudir al acero inoxidable, que ofrece buena resistencia a muchos productos químicos. [APRA-75: 17/30]

TABLA 2 ACEROS DE CONSTRUCCIÓN NAVAL DE ALTA RESISTENCIA

Grado de calidad	A32	D32	E32	A36	D36	E36
C máx.	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
Mn	0,9-1,6	0,9-1,6	0,9-1,6	0,9-1,6	0,9-1,6	0,9-1,6
Si	0,1-0,5	0,1-0,5	0,1-0,5	0,1-0,5	0,1-0,5	0,1-0,5
P máx.	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
S máx.	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
Al	0,07	0,02-0,07	0,02-0,07	0,07	0,02-0,07	0,02-0,07
Nb	-	-	-	0,05	0,02-0,05	0,02-0,05
V	-	-	-	0,1	0,05-0,1	0,05-0,1
Cu máx.	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
Cr máx.	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Ni máx.	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Mo máx.	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08

Al actuar sobre los mismos el campo magnético terrestre, estos hierros son capaces de imantarse. La máxima cantidad de magnetismo que puede almacenar un imán es su inducción remanente  $B_r$ , y la resistencia a la desimanación su fuerza coercitiva  $H_c$ . El

producto de ambos valores,  $Br \times H_c$ , da el índice de calidad del imán, y así, un acero de gran inducción remanente y pequeña fuerza coercitiva -acero suave -, produce malos imanes porque su índice de calidad es bajo (fig. II.11).

La inducción remanente, llamada también permanente, tratándose de aceros, recibe el nombre de residua en el caso del hierro dulce.

La fuerza coercitiva, que es independiente de la intensidad magnética, varía con las calidades del material. El acero duro templado tiene gran fuerza coercitiva, requiere tiempo para su imanación definitiva, pero luego la conserva durante largos períodos con ligeras variaciones. El hierro dulce, por el contrario, tiene poca fuerza coercitiva y en iguales condiciones se imana mucho más que el acero, pero en cuanto deja de actuar el campo magnetizante, vuelve de nuevo al estado casi completamente neutro.

Como se ha dicho,  $Br$  y  $H_c$  son los valores máximos de la inducción remanente y de la fuerza coercitiva en el instante de la imanación, o sea, al tener el circuito magnético cerrado. Al retirar de este circuito el imán, las líneas de fuerza que huyen de los polos cierran el circuito de uno a otro a través del aire, que tiene mayor reluctancia o resistencia magnética que el circuito imanador, y ello es causa de que broten menos líneas de fuerza, pues la superior resistencia es un campo desmagnetizante  $H$ , al que corresponde una menor inducción remanente  $E$ .

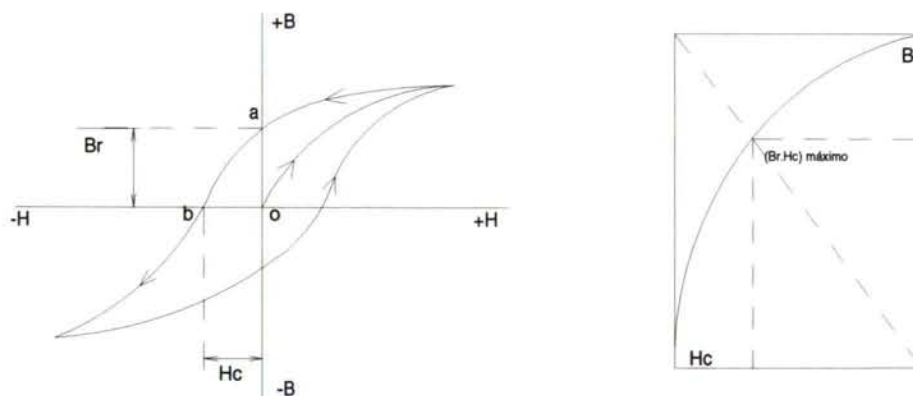


FIGURA II.11.- CURVAS DE INDUCCIÓN Y FUERZA COERCITIVA.[MART-58:12/13]

Los distintos valores de  $E$  y  $H$ , representados en un sistema de coordenadas, forman una curva particular para cada clase de acero, que es la curva de desimanación, expresando



ésta las características y posibilidades de un imán. Las mejores condiciones de trabajo serán, indudablemente, aquellas en que tenga un máximo ( $E \times H$ ), llamado índice de energía o de máximo rendimiento. Para determinar en qué punto de una curva de desimanación se halla el máximo rendimiento, se construye un rectángulo con los valores de  $E_r$  y  $H_c$ , (fig.II.11) y trazando la diagonal del mismo a partir de O, origen de la ordenada y abscisa, allí donde la diagonal corte a la curva de desimanación se encuentra el punto de máxima energía.

Desde el punto de vista magnético, la mayoría de los hierros empleados en la construcción de buques presentan características varias; sin embargo, y a partir de sus efectos sobre la aguja magnética, es perfectamente lícito agruparlos en dos clases:

- Los hierros dulces, de gran permeabilidad magnética y poca fuerza coercitiva, los cuales adquieren y pierden casi instantáneamente el magnetismo inducido en el momento en que actúa y desaparece el campo inductor.
- Los hierros duros o "aceros", de menor permeabilidad magnética pero de mayor fuerza coercitiva, los cuales se imanar con más lentitud cuando sobre ellos actúa el campo magnético, pero conservan su imantación durante largo tiempo sin disminución sensible.

Debido a las características descritas, en el ámbito de las publicaciones náuticas, y en lo sucesivo en la presente investigación, se les denominará "hierros dulces" y "hierros duros".



## 2.2.- CAMPOS MAGNETICOS QUE ACTUAN SOBRE LA AGUJA.

La aguja náutica se encuentra sometida a la acción de tres campos magnéticos y su orientación dependerá de la resultante de dichos campos:

- a) Campo magnético terrestre: Está representado por su componente horizontal  $H$  y es la responsable de la orientación de la aguja según el meridiano magnético. Este campo es constante en magnitud, siendo independiente de la dirección del buque.
- b) Campo magnético permanente: es el debido a los hierros duros del buque. Es constante en intensidad y en posición respecto a la aguja, pero su acción sobre ella varía en función del rumbo.
- c) Campo accidental o inducido: es variable en intensidad y en dirección con respecto a la aguja y el rumbo. [RIBE-61:542]

## 2.3.- MAGNETISMO PERMANENTE.

Los hierros duros que intervienen en la construcción de un buque permanecen en la grada orientados durante largo tiempo en la misma dirección, y por lo tanto a la acción del campo magnético terrestre. Ésto, unido a las operaciones mecánicas ejercidas sobre ellos, tiene como resultado la aparición de un magnetismo permanente en el casco del buque. Este magnetismo se verá alterado posteriormente al quedar amarrado al muelle de armamento, generalmente distinto del de grada, no quedando su polaridad establecida definitivamente hasta algún tiempo después de empezar el buque sus navegaciones.

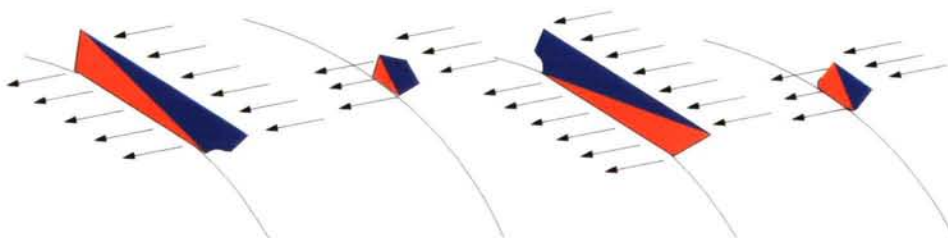


FIGURA II.12.- MAGNETISMO PERMANENTE VERTICAL EN LA GRADA

No obstante, el magnetismo remanente adquirido en la grada es el más influyente y su adquisición se corresponde con las distintas posiciones en la grada y que se exponen a

continuación, teniendo siempre en cuenta que la polaridad azul o sur aparece en la parte por donde entran las líneas de fuerza y la polaridad roja por donde salen. Se supone que el buque de la figura está construido al norte del Ecuador Magnético.

De la figura anterior se deduce que todos los buques construidos en el H.N. magnético adquieren polaridad roja en la quilla y azul en cubierta. Lo contrario sucederá en los buques construidos en el H.S. magnético.[BOWD-84:215]

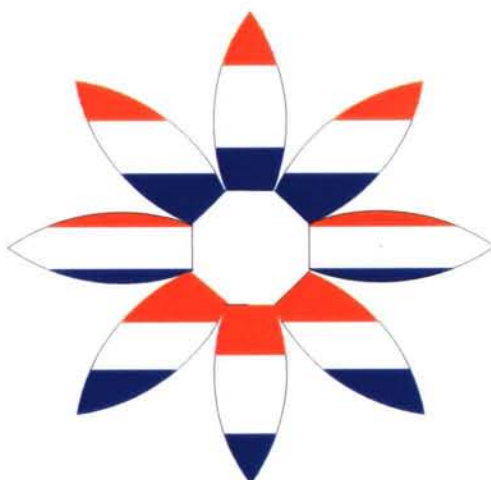


FIGURA II.13.- MAGNETISMO HORIZONTAL EN LA GRADA.

Independientemente del hemisferio donde se haya construido el buque, con proas de componente Norte tendrán polaridades rojas a proa y azules a popa y contrariamente con proas al sur.

Asimismo, con proas al Este la polaridad roja aparece a babor y la azul a estribor y contrariamente con proas al oeste.

El buque, una vez adquirida su polaridad definitiva, se comporta como un imán de grandes dimensiones, por lo que las fuerzas ejercidas por sus polos sobre la aguja se pueden considerar iguales y paralelas, por lo que solamente se estudiará la acción de un solo polo, el considerado más cercano a la aguja.

Para el estudio de la fuerza ejercida por el polo más cercano sobre la aguja, se descompone ésta según los 3 ejes (X, Y, Z) coincidentes con las direcciones proa-popa, babor-estribor y vertical.

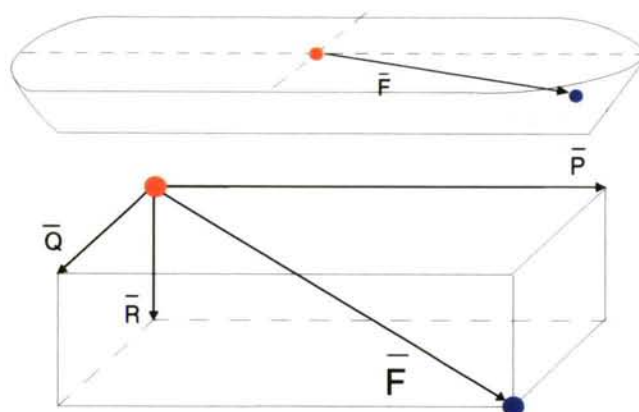


FIGURA II.14.- COMPONENTES DEL MAGNETISMO PERMANENTE.

El buque de la figura [II.14] corresponde a un rumbo de grada del 2º cuadrante; las fuerzas resultantes de la descomposición, según la regla del paralelogramo, de la fuerza del polo azul (considerado el más cercano en su acción sobre la aguja), serán denominadas respectivamente P, Q y R, o más genéricamente imanes permanentes P, Q y R.

### 2.3.1.- SIGNIFICACION Y SIGNO DEL MAGNETISMO PERMENENTE.

Considerando como positivas las direcciones que desvían a la aguja hacia Pr, Er y abajo, los imanes permanentes que cumplan esta condición se considerarán como "P+", "Q+" y "R+". Por lo tanto, un imán "P+" indica un buque construido con la proa hacia el 2º o 3er. cuadrante, mientras que un "P-" indica construcción hacia el 3º o 4º cuadrante.

Un "Q+" significa un buque construido al 1er. o 4º cuadrante y un "Q-" lo será cuando la proa en construcción estuviese al 2º ó 3er cuadrante.

Un "R+" significa que ha sido construido al norte del Ecuador Magnético y un "R-" al Sur de dicho Ecuador.

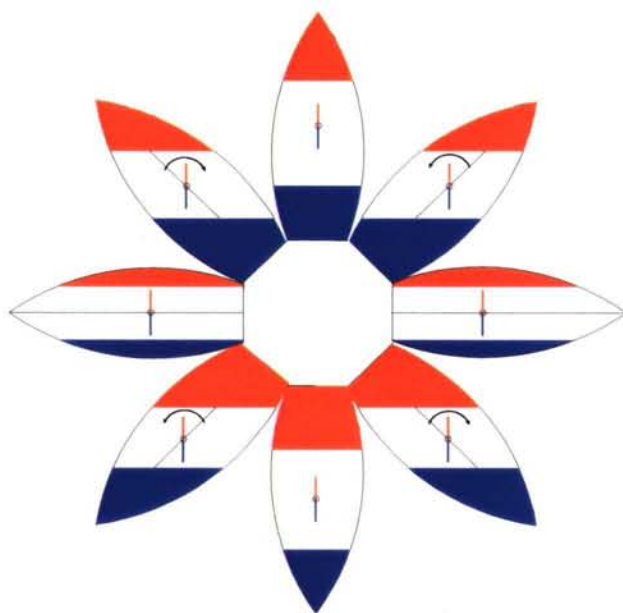


FIGURA II.15.- SIGNO DEL MAGNETISMO PERMANENTE.[MART-58:70]

#### 2.4.- MAGNETISMO INDUCIDO.

Los hierros dulces del buque, capaces de adquirir magnetismo inducido, constituyen fundamentalmente la estructura donde se apoyan las planchas de acero por lo que su posición está ubicada en los planos longitudinal, transversal y vertical, pudiéndose descomponer proyectando sus componentes en los referidos planos.

Estas estructuras, en forma de barras delgadas en comparación con las dimensiones del buque, se pueden asimilar a varillas de longitud indefinida, por lo cual sólo se tendrá en cuenta la acción del polo más cercano a la aguja. La mayor parte de los hierros dulces del buque tienen una distribución simétrica respecto a la aguja, por lo que sus acciones se anulan. La fuerza ejercida por los restantes elementos se descomponen según los ejes rectangulares X, Y, Z; que bien podrían ser las direcciones de proa, estribor y abajo. No obstante, cuando uno de estos elementos no esté en uno de los planos anteriores se puede descomponer y proyectar en los ejes anteriores



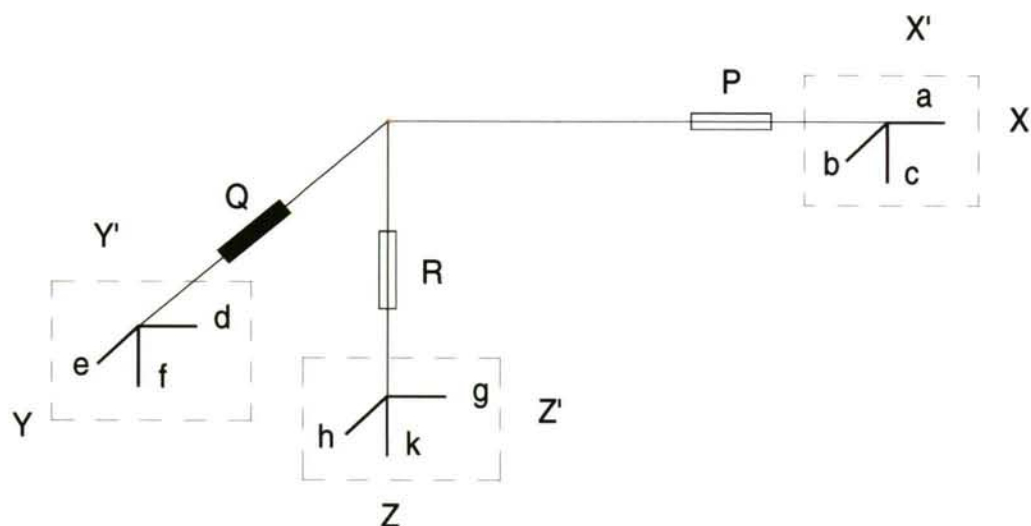


FIGURA II.16.- DESCOMPOSICIÓN DEL MAGNETISMO ACCIDENTAL

Aún así y debido a la complejidad de estos hierros, esta división no satisface todas las hipótesis, por lo que es necesario volver a descomponer los hierros de cada eje predominante en otras tres nuevas componentes, de aquí surge la división tradicional del magnetismo inducido en las llamadas "nueve varillas ideales", con la certeza que todo el magnetismo inducido estará de esta forma representado en alguna de ellas.

Las letras que representan estas varillas "a", "b", "c", "d", "e", "f", "g", "h" y "k", además de indicar su posición respecto a la aguja, representan la susceptibilidad magnética de cada una de ellas.[BURZ-50:292]

#### 2.4.1.- SIGNIFICACION Y SIGNO DEL MAGNETISMO INDUCIDO.

A las varillas anteriormente definidas se les asigna un signo convencional de acuerdo con su posición respecto a la aguja náutica.

Las varillas "a", "e" y "k" serán positivas cuando son cortas, es decir, con los dos polos al mismo lado de la aguja y negativas cuando son corridas, es decir, si pasan de un lado a otro de la aguja, ya que en ambos casos los desvíos que actúan sobre la aguja son de signo contrario.[BOWD-84:292]

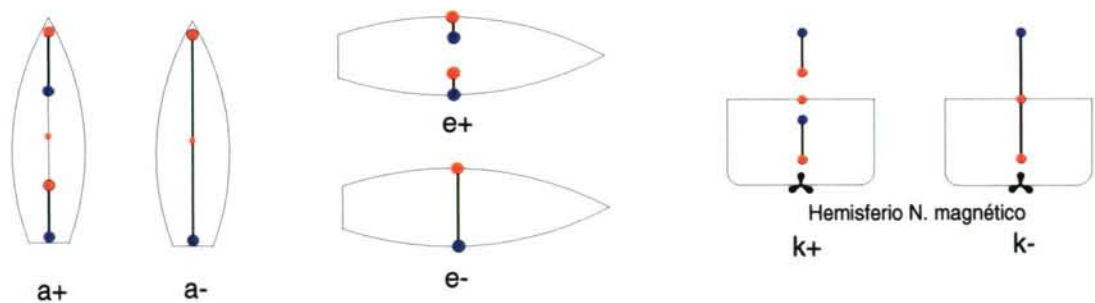


FIG. II.17.- SIGNOS DE LAS VARILLAS "a", "e" y "k".

Para el resto de las varillas se aplica el producto de signos a partir de su posición respecto a la aguja y teniendo en cuenta que las direcciones proa, estribor y abajo se asigna el signo positivo y popa, babor y arriba el signo negativo.

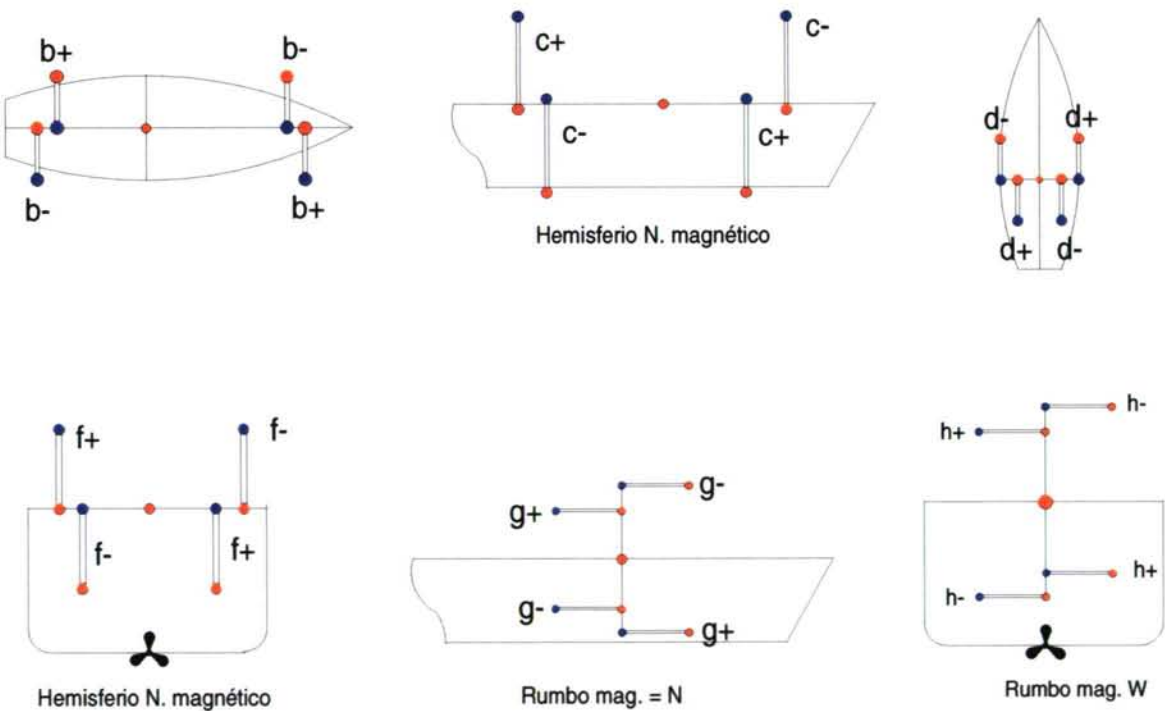


FIGURA II.18.- SIGNOS DE LAS VARILLAS "b", "c", "d", "f", "g" y "h".

Varilla "a".- Representa el hierro dulce longitudinal proyectado simétricamente en el eje proa-

popa, tal como la quilla, mamparos longitudinales etc. Estos hierros generalmente son corridos, por lo tanto la varilla "a" es negativa.

Varilla "e".- Representa el hierro dulce transversal simétrico tal como baos y mamparos transversales. Estos hierros son generalmente corridos de babor a estribor, por lo tanto la varilla "e" es negativa.

Varilla "k".- Representa el hierro dulce vertical proyectado simétricamente en el eje vertical de la aguja, chimenea, palo mayor etc., generalmente positivo.

Varillas "b", "d", "f", "h", representan el hierro dulce asimétrico; en una aguja correctamente instalada en el plano de crujía y en buques de construcción simétrica no tienen razón de existencia; aún así en caso de existir, tienen poco valor.

Varilla "c". - Significa el hierro dulce vertical sobre el plano longitudinal, (palos, grúas etc.) Generalmente negativo.

Varilla "g".- Representa el hierro dulce longitudinal por debajo del plano de la aguja. Estos hierros suelen estar en la sala de máquinas y por su posición respecto de la aguja, ejercen una acción muy limitada. [SUBS-72]

### **3.- FUERZAS QUE ACTÚAN SOBRE LA AGUJA**





### 3.1.- FUERZA QUE SOLICITA LA AGUJA AL NORTE MAGNÉTICO.

Sobre la aguja náutica instalada a bordo actúan tres campos magnéticos: el terrestre, el de los hierros dulces o accidental y el de los hierros duros o permanente.

Las componentes del campo magnético terrestre sobre los ejes Proa-Popa, Babor-Estribor y vertical se denominarán por X, Y, Z.

Las componentes del campo magnético accidental sobre los ejes anteriores se denominarán X', Y' y Z'.

Las componentes del campo magnético permanente, tal como se vio anteriormente se denominarán P, Q y R. [CAPA-85:27]

Cada una de las nueve varillas ideales que representan el hierro dulce inducido están influenciadas por la componente del magnetismo terrestre paralelo a ella, de tal manera que las varillas "a", "d" y "g" están inducidas por la componente X; las varillas "b", "e" y "h" por la componente Y y las varillas "c", "f" y "k" por la componente Z.

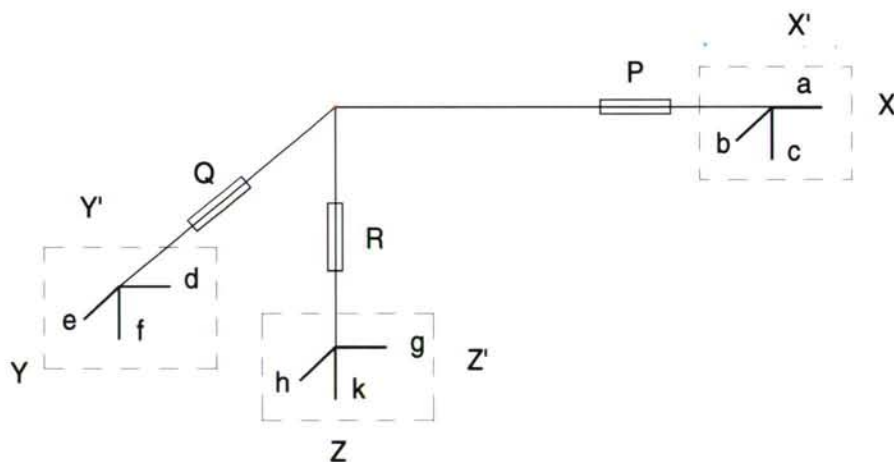


FIGURA II.19.- CAMPOS ACTUANTES SOBRE LA AGUJA

De lo anterior resulta:

$$F(x) = X + X' + P = X + aX + bY + cZ + P = X(1 + a) + bY + cZ + P$$

$$F(y) = Y + Y' + Q = Y + dX + eY + fZ + Q = Y(1 + e) + dX + fZ + Q$$

$$F(z) = Z + Z' + R = Z + gX + hY + kZ + R = Z(1 + k) + gX + hY + R$$

Con el buque adrizado, la fuerza vertical no produce desvío en la aguja, por lo que se estudian solamente  $F(x)$  y  $F(y)$ .

Expresando las componentes X e Y en función de H, según la figura expuesta:

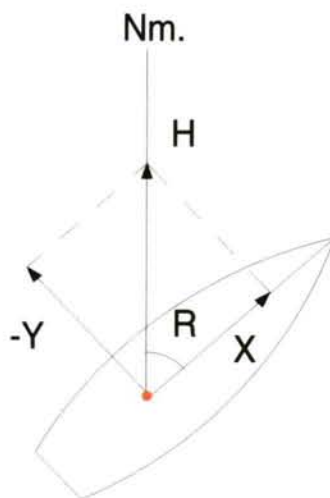


FIGURA II.20.- PROYECCIÓN DE H. .[BURZ-50:289]

$$X = H \cdot \cos R$$

$Y = -H \cdot \sin R$  (El signo - se justifica porque según la figura de que se parte, la componente es a babor)

Sustituyendo:

$$F(x) = H \cdot \cos R(1 + a) - bH \cdot \sin R + cZ + P$$

$$F(y) = -H \cdot \sin R(1 + e) + dH \cdot \cos R + fZ + Q$$

Se denomina fuerza al Norte o fuerza directriz a la que orienta la aguja al  $N_m$ , o sea, la componente según el eje N/S de las fuerzas  $F(x)$  y  $F(y)$ .

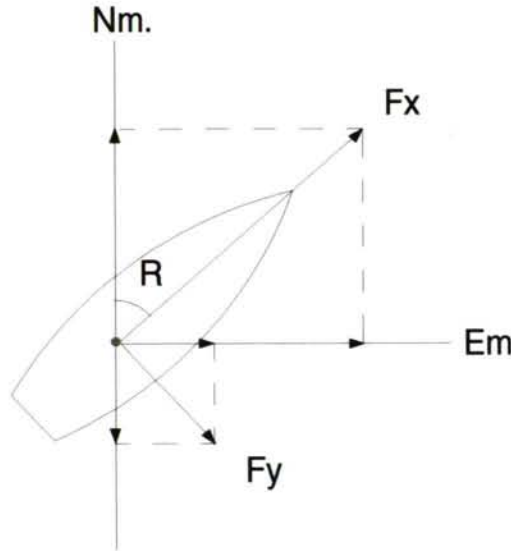


FIGURA II.21.- FUERZA AL NORTE

$$F_N = F_x \cdot \cos R - F_y \cdot \sin R$$

$$F_N = H \cdot \cos^2 R(1 + a) - bH \cdot \sin R \cdot \cos R + cZ \cdot \cos R + P \cdot \cos R - \\ H \cdot \sin^2 R(1 + e) - dH \cdot \sin R \cdot \cos R - fZ \cdot \sin R - Q \cdot \sin R$$

Haciendo las sustituciones siguientes:

$$\cos^2 R = \frac{1 + \cos 2R}{2}$$

$$\sin^2 R = \frac{1 - \cos^2 R}{2}$$

$$\frac{\sin 2R}{2} = \sin R \cdot \cos R$$

y agrupando los términos en función de  $\sin R$ ,  $\sin 2R$ ,  $\cos R$ ,  $\cos 2R$ , resulta:

$$F_N = H \left( 1 + \frac{a+e}{2} \right) + \cos R (P + cZ) - \sin R (Q + fZ) + \\ H \cdot \cos 2R \frac{a-e}{2} - H \cdot \sin 2R \frac{d+b}{2} \quad [\text{II.21}]$$

Denominando por  $\lambda$  (coeficiente  $\lambda$ ) al término  $1 + \frac{a+e}{2}$  y dividiendo la expresión [II.21] por  $\lambda H$  (tomando  $\lambda H$  por unidad para medir estas fuerzas) [FOSS-61:746], queda:



$$\frac{F_N}{\lambda H} = 1 + \cos R \left( \frac{P}{\lambda H} + \frac{c}{\lambda} \cdot \operatorname{tg} \theta \right) - \sin R \left( \frac{Q}{\lambda H} + \frac{f}{\lambda} \cdot \operatorname{tg} \theta \right) + \cos 2R \left( \frac{a-e}{2\lambda} \right) - \sin 2R \left( \frac{d+b}{2\lambda} \right) \quad [\text{II.22}]$$

A los términos expresados entre paréntesis se les denomina por  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  y  $\varepsilon$ , siendo los coeficientes exactos del desvío.

Por lo tanto, la expresión de la fuerza al Norte es:

$$\frac{F_N}{\lambda H} = 1 + \beta \cdot \cos R + \gamma \cdot \sin R + \delta \cdot \cos 2R - \varepsilon \cdot \sin 2R \quad [\text{II.23}]$$

### 3.2.- FUERZA QUE SOLICITA LA AGUJA AL ESTE MAGNÉTICO

Se denomina fuerza al Este o fuerza desviadora a la que tiende a separar la aguja del meridiano magnético; por lo tanto es la proyección de  $F(x)$  y  $F(y)$  sobre el eje E/W magnético.

De la figura [II.21] resulta:

$$F_E = F_X \cdot \sin R + F_Y \cdot \cos R$$

$$F_E = H \cdot \sin R \cdot \cos R(1+a) - bH \cdot \sin^2 R + cZ \cdot \sin R + P \cdot \sin R - \\ H \cdot \sin R \cdot \cos R(1+e) + dH \cdot \cos^2 R + fZ \cdot \cos R + Q \cdot \cos R$$

Haciendo las mismas sustituciones que en la fórmula anterior y agrupando en el mismo orden, queda:

$$F_E = H \frac{d-b}{2} + \sin R(P+cZ) + \cos R(Q+fZ) + H \cdot \sin 2R \frac{a-e}{2} + H \cdot \cos 2R \frac{d+b}{2}$$

Dividiendo por  $\lambda H$  (tomando  $\lambda H$  por unidad para medir estas fuerzas):

$$\frac{F_E}{\lambda H} = \frac{d-b}{2\lambda} + \sin R \left( \frac{P}{\lambda H} + \frac{c}{\lambda} \operatorname{tg} \theta \right) + \cos R \left( \frac{Q}{\lambda H} + \frac{f}{\lambda} \operatorname{tg} \theta \right) + \sin 2R \left( \frac{a-e}{2\lambda} \right) + \cos 2R \left( \frac{d+b}{2\lambda} \right) \quad [\text{II.24}]$$

Los términos entre paréntesis son los coeficientes exactos  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  y  $\varepsilon$ , el término independiente  $\frac{d-b}{2\lambda}$  es el coeficiente  $\alpha$ , por lo tanto:

$$\frac{F_E}{\lambda H} = \alpha + \beta \cdot \text{sen } R + \gamma \cdot \text{cos } R + \delta \cdot \text{sen } 2R + \varepsilon \cdot \text{cos } 2R \quad [\text{II.25}]$$

fórmula que expresa la fuerza al Este o fuerza desviadora. [CAPA-85:57/62]

### 3.3.- FUERZA DIRECTRIZ MEDIA

La fuerza directriz o fuerza al Norte viene expresada en función del rumbo, por lo tanto su valor experimentará cambios a medida que la proa arrumbe a rumbos diferentes.

Si establecemos la ecuación de la fuerza al Norte en su expresión

$$F_N = H \left( 1 + \frac{a+e}{2} \right) + \text{cos } R (P + cZ) - \text{sen } R (Q + fZ) + \\ H \cdot \text{cos } 2R \left( \frac{a-e}{2\lambda} \right) - H \cdot \text{sen } 2R \left( \frac{d+b}{2\lambda} \right)$$

a una serie de rumbos simétricos, por ejemplo los 32 fundamentales del sistema de cuartas de la aguja náutica, y hallamos el promedio, se obtiene la fuerza directriz media:

$$\sum_{32} F_N = 32 \cdot H \left( 1 + \frac{a+e}{2} \right) = 32 \cdot \lambda \cdot H$$

ya que para estos rumbos, la suma de los términos afectados de senos y cosenos es igual a cero.

Por lo tanto:

$$\lambda H = \frac{\sum_{32} F_N}{32}$$

y en general:

$$\lambda H = \frac{\sum_n F_N}{n} \quad [\text{II.26}]$$

expresando el término  $\lambda H$  el valor de la fuerza directriz media.

### 3.2.1.- CALCULO DEL COEFICIENTE $\lambda$ EN SUS DOS EXPRESIONES: $\lambda_1$ Y $\lambda_2$ .

Las dos fuerzas,  $F_N$  y  $F_E$ , al actuar sobre la aguja la orientan respecto a una resultante,  $H'$ , que forma con  $H$  (que sigue el meridiano magnético) un ángulo igual al desvío,  $\Delta$ .

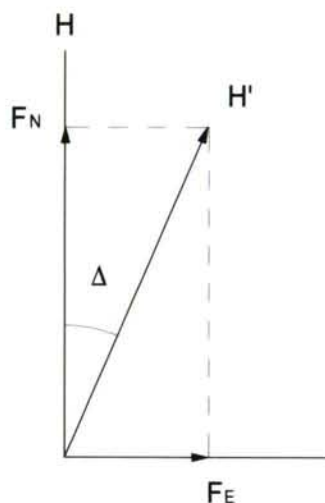


FIGURA II.22.- EXPRESIÓN GRÁFICA DEL DESVÍO

$$F_N = H' \cdot \cos \Delta \quad F_E = H' \cdot \sin \Delta \quad [\text{II.27}]$$

Teniendo en cuenta [II.26], despejando  $\lambda$ :

$$\lambda = \frac{\sum_n H' \cdot \cos \Delta}{n \cdot H}$$

Para los cuatro rumbos cardinales:

$$\lambda = \frac{\sum_4 H' \cdot \cos \Delta}{4H} = \frac{H' \cdot \cos \Delta_N + H' \cdot \cos \Delta_E + H' \cdot \cos \Delta_S + H' \cdot \cos \Delta_W}{4H}$$

$$\lambda = \frac{1}{4} \left( \frac{H'}{H} \cos \Delta_N + \frac{H'}{H} \cos \Delta_E + \frac{H'}{H} \cos \Delta_S + \frac{H'}{H} \cos \Delta_W \right) \quad [\text{II.28}]$$

Por medio de una aguja magnética oscilante se calcula el periodo en tierra:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{F}{M \cdot H}}$$

Se repite la operación a bordo, retirando previamente el mortero y colocando la aguja magnética oscilante en su lugar; el periodo  $T'$  así calculado para los cuatro rumbos cardinales será:

$$T' = 2\pi\sqrt{\frac{F}{M \cdot H'}}$$

Relacionando ambos periodos, se tiene:

$$\frac{T'}{T} = \frac{2\pi\sqrt{\frac{F}{M \cdot H}}}{2\pi\sqrt{\frac{F}{M \cdot H'}}}; \quad \frac{T^2}{T'^2} = \frac{H'}{H}$$

sustituyendo en [II.27]:

$$\lambda = \frac{1}{4} \left( \frac{T_N^2}{T_N'^2} \cos \Delta_N + \frac{T_E^2}{T_E'^2} \cos \Delta_E + \frac{T_S^2}{T_S'^2} \cos \Delta_S + \frac{T_W^2}{T_W'^2} \cos \Delta_W \right) \quad [\text{II.29}]$$

El valor de  $\lambda$  está expresado función de las varillas “a” y “e”; el efecto de estas varillas se corrige mediante esferas de hierro dulce que modifican el valor de estas dos varillas, tal como se verá en posteriormente. [RIBE-61:594]

De acuerdo con lo anterior, el valor de  $\lambda$  se denominará como  $\lambda_1$  si no se ha efectuado la compensación del desvío cuadrantal mediante esferas y  $\lambda_2$  se ha efectuado la compensación citada.

Es necesario observar que la fuerza directriz media es el valor de  $\lambda H$  y que  $\lambda$  es simplemente la relación entre el promedio de la fuerza directriz y la componente  $H$  del magnetismo terrestre.

El valor de  $\lambda_2$ , o sea, una vez colocadas las esferas, varía normalmente de 0,8 a 0,9, bajando este valor en las agujas instaladas dentro del puente de navegación, lo que se traduce en una disminución de la sensibilidad de la aguja.



### 3.4.- EXPRESIÓN DE LA ECUACIÓN EXACTA DEL DESVÍO.

Dividiendo los valores de  $F_N$  [II.23] y  $F_E$  [II.25] y teniendo en cuenta la expresión [II.27] se tiene como expresión de la ecuación exacta del desvío [DENN-79:74]

$$\operatorname{tg} \Delta = \frac{\frac{F_E}{\lambda H}}{\frac{F_N}{\lambda H}} = \frac{\alpha + \beta \cdot \operatorname{sen} R + \gamma \cdot \cos R + \delta \cdot \operatorname{sen} 2R + \varepsilon \cdot \cos 2R}{1 + \beta \cdot \cos R - \gamma \cdot \operatorname{sen} R + \delta \cdot \cos 2R - \varepsilon \cdot \operatorname{sen} 2R} \quad [\text{II.30}]$$

#### 3.4.1.- EXPRESIÓN DE LA ECUACIÓN APROXIMADA DEL DESVÍO.

Poniendo  $\operatorname{tg} \Delta$  como  $\frac{\operatorname{sen} \Delta}{\cos \Delta}$  en la ecuación anterior y quitando denominadores:

$$\operatorname{sen} \Delta + \beta \cdot \cos R \cdot \operatorname{sen} \Delta - \gamma \cdot \operatorname{sen} R \cdot \operatorname{sen} \Delta + \delta \cdot \cos 2R \cdot \operatorname{sen} \Delta - \varepsilon \cdot \operatorname{sen} 2R \cdot \cos \Delta = \\ \alpha \cdot \cos \Delta + \beta \cdot \operatorname{sen} R \cdot \cos \Delta + \gamma \cdot \cos R \cdot \cos \Delta + \delta \cdot \operatorname{sen} 2R \cdot \cos \Delta + \varepsilon \cdot \cos 2R \cdot \cos \Delta$$

Despejando  $\operatorname{sen} \Delta$ , sacando factores comunes y reduciendo:

$$\operatorname{sen} \Delta = \alpha \cdot \cos \Delta + \beta \cdot \operatorname{sen}(R - \Delta) + \gamma \cdot \cos(R - \Delta) + \delta \cdot \operatorname{sen}(2R - \Delta) + \varepsilon \cdot \cos(2R - \Delta) \quad [\text{II.31}]$$

Teniendo en cuenta que:

$$R = R_a + \Delta \quad (\text{Relación entre el rumbo magnético y el de aguja}).$$

$$R_a = R - \Delta \quad [\text{II.32}]$$

Multiplicando esta expresión por 2 y sumando un  $\Delta$  en cada uno de los miembros:

$$2R_a + \Delta = 2R - \Delta \quad [\text{II.33}]$$

Sustituyendo [II.32] y [II.33] en [II.31], se tiene: [CAPA-85:85]

$$\operatorname{sen} \Delta = \alpha \cdot \cos \Delta + \beta \cdot \operatorname{sen} R_a + \gamma \cdot \cos R_a + \delta \cdot \operatorname{sen}(2R_a + \Delta) + \varepsilon \cdot \cos(2R_a + \Delta) \quad [\text{II.34}]$$

Considerando que el desvío es un ángulo pequeño, se pueden efectuar las sustituciones siguientes:

$$\operatorname{sen} \Delta \approx \Delta \cdot \operatorname{sen} 1^\circ$$

$$\cos \Delta \approx 1$$

$$2R_a + \Delta \approx 2R_a$$

por lo que la expresión [II.34] queda de la forma siguiente:

$$\Delta \cdot \sin 1^\circ = \alpha + \beta \cdot \sin R_a + \gamma \cdot \cos R_a + \delta \cdot \sin 2R_a + \varepsilon \cdot \cos 2R_a$$

Dividiendo ambos términos por  $\sin 1^\circ$ :

$$\Delta = \frac{\alpha}{\sin 1^\circ} + \frac{\beta}{\sin 1^\circ} \sin R_a + \frac{\gamma}{\sin 1^\circ} \cos R_a + \frac{\delta}{\sin 1^\circ} \sin 2R_a + \frac{\varepsilon}{\sin 1^\circ} \cos 2R_a$$

Las expresiones  $\frac{\alpha}{\sin 1^\circ}$ ,  $\frac{\beta}{\sin 1^\circ}$ ,  $\frac{\gamma}{\sin 1^\circ}$ ,  $\frac{\delta}{\sin 1^\circ}$  y  $\frac{\varepsilon}{\sin 1^\circ}$  se conocen como los coeficiente aproximados A, B, C, D y E; la ecuación del desvío queda bajo la expresión:

$$\Delta = A + B \cdot \sin R_a + C \cdot \cos R_a + D \cdot \sin 2R_a + E \cdot \cos 2R_a \quad [\text{II.35}]$$

que es la llamada “*ecuación aproximada del desvío en función del rumbo de aguja*” o *ecuación de Archibald Smith*. [CAPA-85:86]

### 3.4.1.- COMPONENTES DE LA ECUACIÓN APROXIMADA DEL DESVÍO.

La ecuación aproximada del desvío se puede dividir en tres componentes o partes:

- Desvío constante, representado por A.
- Desvío semicircular, representado por  $B \cdot \sin R_a + C \cdot \cos R_a$ .
- Desvío cuadrantal, representado por  $D \cdot \sin 2R_a + E \cdot \cos 2R_a$ .

El desvío constante, denominado así por no depender del rumbo del buque, viene representado en la ecuación aproximada del desvío por el coeficiente A, que a su vez depende del coeficiente  $\alpha$ , en cuya expresión intervienen las varillas “d” y “b”.

Por razones de comodidad, a partir de este párrafo se sustituye la expresión  $R_a$  (rumbo de aguja) por R.

Dos pueden ser las causas de la existencia de este desvío: una defectuosa instalación del mortero, que provoca un desalineamiento de la línea de fe con la línea de Proa-Popa y/o la existencia de varillas asimétricas “d” y “b”.

El desvío semicircular, denominado así por tomar valores iguales cada  $180^\circ$ , viene determinado por  $B \sin R + C \cos R$ , expresión que se puede transformar de la siguiente manera:

$$\Delta_{\text{semic}} = B \sin R + C \cos R = B \left( \sin R + \frac{C}{B} \cos R \right);$$

haciendo  $\operatorname{tg} W = \frac{C}{B}$

$$\Delta_{\text{semic}} = B \left( \sin R + \frac{\sin W}{\cos W} \cos R \right) = \frac{B}{\cos W} \sin(R + W)$$

Teniendo en cuenta que:

$$\sec^2 W = 1 + \operatorname{tg}^2 W = 1 + \frac{C^2}{B^2}, \quad \sec W = \frac{\sqrt{B^2 + C^2}}{B}$$

Por lo tanto:

$$\Delta_{\text{semic}} = \sqrt{B^2 + C^2} \sin(R + W) \quad [\text{II.36}]$$

expresión que indica que el desvío semicircular es máximo para valores de:

$$R + W = 90^\circ, 270^\circ$$

y nulo para valores de:

$$R + W = 0^\circ, 180^\circ$$

El desvío cuadrantal, denominado así por tomar valores iguales cada  $90^\circ$ , viene definido por la expresión  $D \sin 2R + E \cos R$ ; operando de forma idéntica al caso anterior, se tiene:

$$\Delta_{\text{cuad.}} = D \left( \sin 2R + \frac{E}{D} \cos 2R \right)$$

Haciendo  $\operatorname{tg} 2W' = \frac{E}{D}$

y sustituyendo, se llega a la expresión final:

$$\Delta_{\text{cuad.}} = \sqrt{D^2 + E^2} \sin 2(R + W') \quad [\text{II.37}]$$

El desvío cuadrantal será máximo para valores de:

$$R + W' = 045^\circ, 135^\circ, 225^\circ \text{ y } 315^\circ$$

y será nulo para valores de

$$R + W' = 0^\circ, 090^\circ, 180^\circ \text{ y } 270^\circ$$

## 3.4.2.- CALCULO DE LOS COEFICIENTES APROXIMADOS.

Para calcular los 5 coeficientes de la ecuación aproximada del desvío se determina el valor de éste a un número mínimo de 5 rumbos, 4 cardinales y uno cuadrantal, aunque es preferible determinarlos a 8 rumbos equidistantes, generalmente los cardinales y los cuadrantales.

Determinando los desvíos a los rumbos cardinales, se tiene:

$$\begin{aligned}
 a R_a = N & \quad \Delta N = A + C + E \\
 a R_a = E & \quad \Delta N = A + B - E \\
 a R_a = S & \quad \Delta N = A - C + E \\
 a R_a = W & \quad \Delta N = A - B - E
 \end{aligned} \tag{II.38}$$

De las cuatro ecuaciones se deduce:

$$\begin{aligned}
 A &= \frac{\Delta N + \Delta E + \Delta S + \Delta W}{4} \\
 B &= \frac{\Delta E - \Delta W}{2} \\
 C &= \frac{\Delta N - \Delta S}{2} \\
 E &= \frac{\Delta N + \Delta S - (\Delta E + \Delta W)}{4}
 \end{aligned} \tag{II.39}$$

Determinando los desvíos a los rumbos cuadrantales:

$$\begin{aligned}
 a R_a = NE & \quad \Delta NE = A + \frac{\sqrt{2}}{2} B + \frac{\sqrt{2}}{2} C + D \\
 a R_a = SE & \quad \Delta SE = A + \frac{\sqrt{2}}{2} B - \frac{\sqrt{2}}{2} C - D \\
 a R_a = SW & \quad \Delta SW = A - \frac{\sqrt{2}}{2} B - \frac{\sqrt{2}}{2} C + D \\
 a R_a = NW & \quad \Delta NW = A - \frac{\sqrt{2}}{2} B + \frac{\sqrt{2}}{2} C - D
 \end{aligned} \tag{II.40}$$



De las cuatro ecuaciones se deduce:

$$A = \frac{\Delta NE + \Delta SE + \Delta SW + \Delta NW}{4}$$

$$B = \frac{(\Delta NE + \Delta SE) - (\Delta SW + \Delta NW)}{2\sqrt{2}}$$

$$C = \frac{(\Delta NE + \Delta NW) - (\Delta SE + \Delta SW)}{2\sqrt{2}}$$

$$D = \frac{\Delta NE + \Delta SW - (\Delta SE + \Delta NW)}{4} \quad [\text{II.41}]$$

Generalmente, el cálculo de los coeficiente se determina mediante los rumbos cardinales para la obtención de A, B, C y E, utilizando los cuadrantales solamente para el cálculo del coeficiente D. [SUBS-72]

El conocimiento de los coeficientes aproximados tiene por objeto ir anulándolos unos a uno, operación denominada compensación, o bien de su conocimiento poder determinar el desvío a un rumbo cualquiera.

#### **4.- DESVÍOS ORIGINADOS EN LA AGUJA**



#### 4.1.- ANÁLISIS PORMENORIZADO DE LOS DESVÍOS PRODUCIDOS POR LAS DISTINTAS CLASES DE HIERROS DEL BUQUE.

##### 4.1.1.- DESVÍOS DE LOS IMANES P, Q y R.

Teniendo en cuenta que todo hierro del buque queda representado por tres imanes permanentes P, Q y R y por nueve varillas ideales ya descritas anteriormente, se procede a analizar separadamente los desvíos causados por cada una de ellas.

En una aguja correctamente instalada a bordo de un buque mercante, solamente tienen influencia los imanes P, Q, y R y las varillas “a”, “c”, “e”, “g” y “k”, siendo nulo o despreciable la influencia de las varillas asimétricas “b”, “d”, “f” y “h”.

En la ecuación exacta del desvío [II.24] la acción del imán P viene expresada por  $\frac{P}{\lambda H} \sin R$ ; la curva de desvíos, en su aspecto analítico y gráfico, será la siguiente (P+):

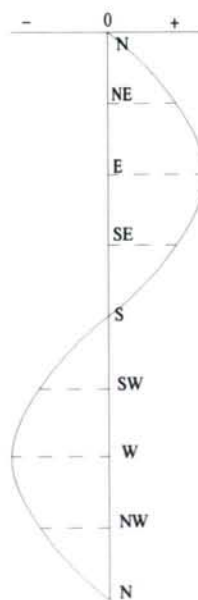
$$\Delta P = \frac{R}{\lambda H} \sin R$$

$$R = 0^\circ \quad \Delta P = 0$$

$$R = 090^\circ \quad \Delta P = \frac{P}{\lambda H}$$

$$R = 180^\circ \quad \Delta P = 0$$

$$R = 270^\circ \quad \Delta P = -\frac{P}{\lambda H}$$





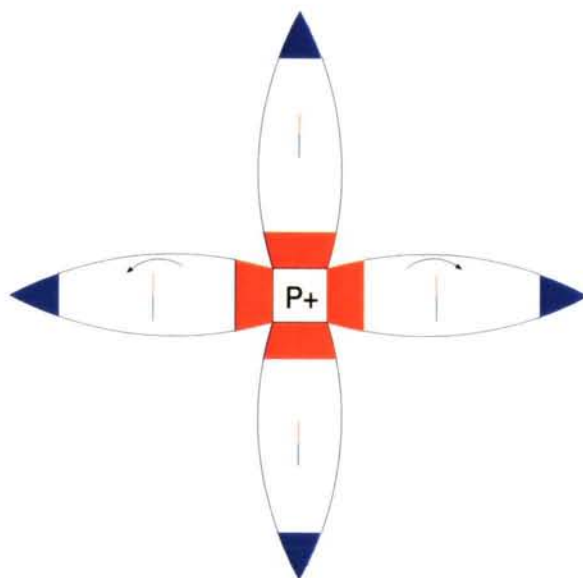


FIGURA II.23.- DESVÍOS ANALÍTICO Y GRÁFICO DEL IMÁN P (+)

La curva resultante, de tipo sinusoidal, tiene sus máximos a los rumbos 090° y 270° y sus mínimos (nulos) a 0° y 180°.

La acción del imán Q viene expresada en la ecuación exacta del desvío por

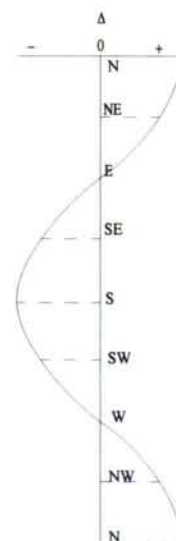
$$\frac{Q}{\lambda H} \cos R$$

la curva de desvíos resultante será (para Q+):

$$R = 0^\circ \quad \Delta Q = \frac{Q}{\lambda H}$$

$$R = 090^\circ \quad \Delta Q = 0$$

$$R = 180^\circ \quad \Delta Q = -\frac{Q}{\lambda H}$$



$$R = 270^\circ \quad \Delta Q = 0$$

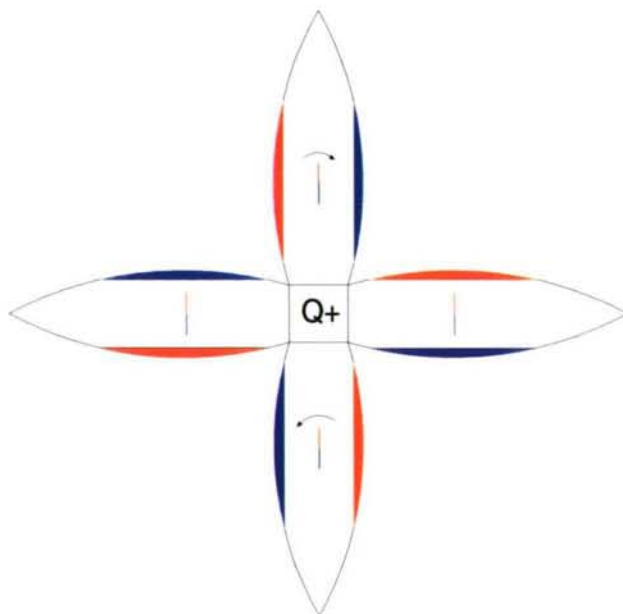


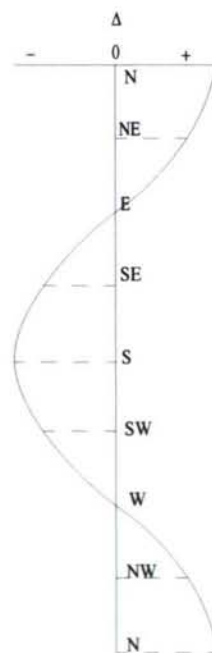
FIGURA II.24.- DESVÍO ANALÍTICO Y GRÁFICO DEL IMÁN Q (+)

La resultante es otra curva sinusoidal, con sus máximos a los rumbos  $0^\circ$  y  $180^\circ$  y nulos a los rumbos  $090^\circ$  y  $270^\circ$ . [CAIL-89:94/95]

El imán R no figura en la ecuación exacta del desvío con el buque adrizado; será deducida posteriormente al tratar el desvío de escora; no obstante se puede adelantar que es función de  $\cos R$ ; la curva de desvíos se deduce para un R (+) y escora a babor.

$$\Delta_R = \frac{-R}{\lambda H} i \cdot \cos R$$

$$R = 0 \quad \Delta_R = \frac{-R}{\lambda H} (-i)$$



$$R = 090 \quad \Delta_R = 0$$

$$R = 180 \quad \Delta_R = \frac{-R}{\lambda H} (-i)(-1)$$

$$R = 270 \quad \Delta_R = 0$$

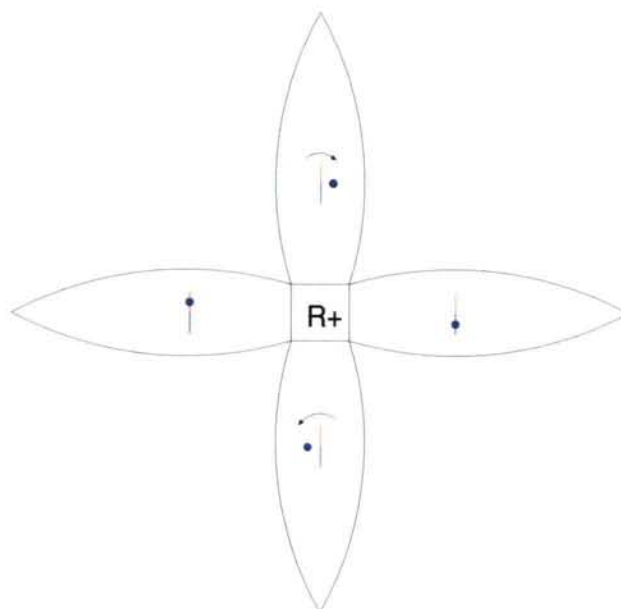


FIGURA II.25.- DESVÍO ANALÍTICO Y GRÁFICO DEL IMÁN R (+)

La curva resultante tiene los máximo a los rumbos  $0^\circ$  y  $180^\circ$  y nulos a los rumbos  $090^\circ$  y  $270^\circ$ .

#### 4.1.2.- DESVÍOS PRODUCIDOS POR LAS VARILLAS “a”, “e”

La varilla “a” figura en la ecuación exacta del desvío por la expresión  $\frac{a}{2\lambda} \sin 2R$ ; la curva de los desvíos provocados por ella se expone a continuación para una varilla “a” negativa, generalmente la que poseen los buques mercantes.

El análisis de esta varilla, en conjunción con la varilla “e”, que se expone a continuación, constituyen parte del cuerpo de investigación de la presente Tesis Doctoral, pues de su modificación a través de un nuevo elemento corrector, la tercera esfera, se anula la parte accidental del desvío de escora y a su vez obliga a modificar las esferas en sentido babor-estribor para reajustar la anulación del desvío cuadrantal, afectado por la incorporación de esta nueva esfera.

$R = 0^\circ$	$\Delta a = 0$
$R = 045^\circ$	$\Delta a = -\frac{a}{2\lambda}$
$R = 090^\circ$	$\Delta a = 0$
$R = 135^\circ$	$\Delta a = +\frac{a}{2\lambda}$
$R = 180^\circ$	$\Delta a = 0$
$R = 225^\circ$	$\Delta a = -\frac{a}{2\lambda}$
$R = 270^\circ$	$\Delta a = 0$
$R = 315^\circ$	$\Delta a = +\frac{a}{2\lambda}$

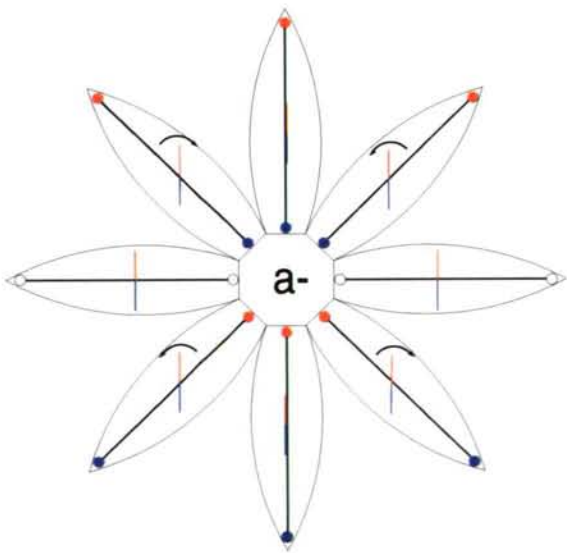
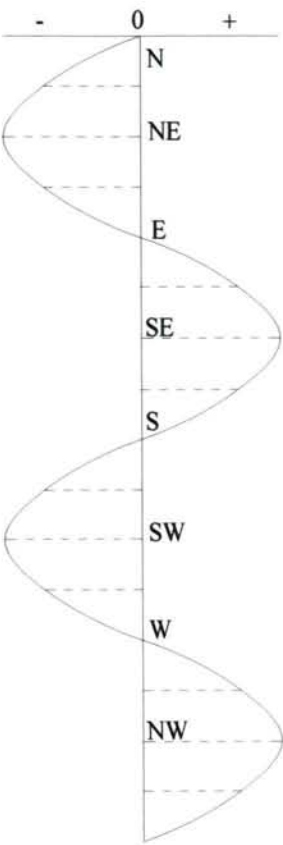


FIGURA II.26.- DESVÍO DE LA VARILLA “a” (-) [MACI-54:151]



La curva de desvíos resultante tiene sus máximos a los rumbos cuadrantales y los nulos a los rumbos cardinales.

La expresión del desvío producido por una varilla “e” en la ecuación exacta es  $-\frac{e}{2\lambda}\sin 2R$ ; la curva de desvíos producidos por esta varilla, en forma gráfica y analítica, se expone a continuación para el caso de una varilla “e” negativa, la usual en los buques mercantes. [MORE-72:126]

$$R = 0 \quad \Delta_e = 0$$

$$R = 045 \quad \Delta_e = \frac{e}{2\lambda}$$

$$R = 090 \quad \Delta_e = 0$$

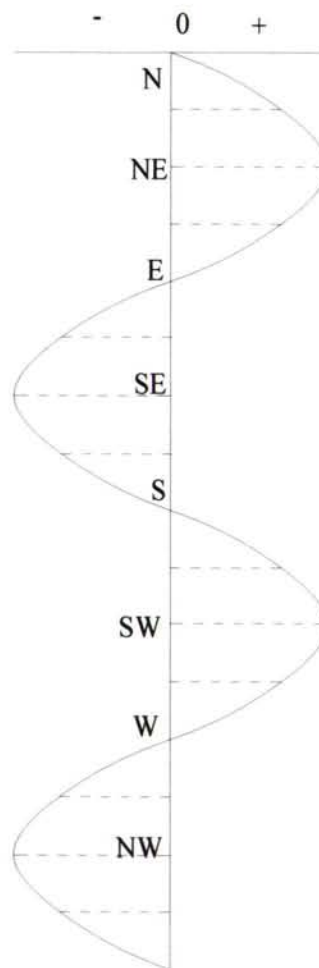
$$R = 135 \quad \Delta_e = -\frac{e}{2\lambda}$$

$$R = 180 \quad \Delta_e = 0$$

$$R = 225 \quad \Delta_e = \frac{e}{2\lambda}$$

$$R = 270 \quad \Delta_e = 0$$

$$R = 315 \quad \Delta_e = -\frac{e}{2\lambda}$$



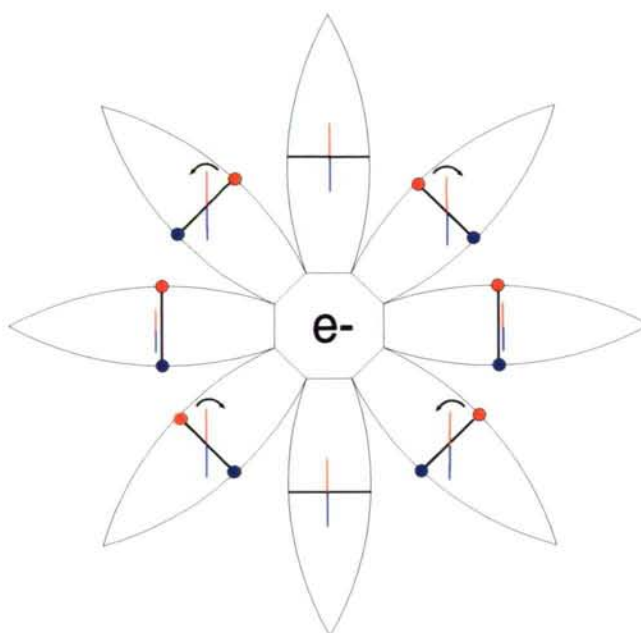


FIGURA II.27.- DESVÍOS DE LA VARILLA “e” (-)

La curva resultante, de tipo cuadrantal, tiene sus máximos a los rumbos 045°, 135°, 225° y 315° y nulos a los rumbos 0°, 090°, 180° y 270°. [RIBE-61:556/557]

#### 4.1.2.1.- ACCIÓN COMBINADA DE LAS VARILLAS “a” y “e”.

La varillas “a” y “e” negativas, usuales a bordo de los buques mercantes, producen desvíos de tipo cuadrantal pero de signos contrarios. Ambos efectos se anularían si “a” y “e” fuesen iguales, pero en la práctica siempre predomina el valor de la varilla “e” sobre el valor de la varilla “a” por tener polos más cerca de la aguja (recuérdese que los polos de la varilla “a” negativa están casi en los extremos de la eslora del buque, mientras que los polos de la varilla “e” negativa están a los extremos de la manga).

La resultante del desvío de ambas varillas es un efecto “e” menor que el original. En la figura [II.28] se representa en color azul el desvío provocado por una varilla a negativa y en color negro la acción de una varilla e negativa de valor doble a la anterior. En color rojo se tienen la acción resultante de ambas.

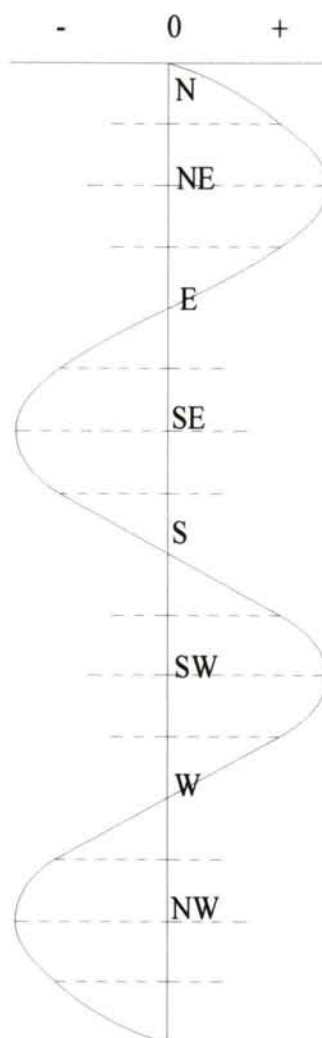


FIGURA II.28.- ACCIÓN COMBINADA DE LAS VARILLAS “a” y “e”

#### 4.1.3.- DESVÍOS PRODUCIDOS POR LAS VARILLAS “c”, “g” y “k”.

La varilla “c” figura en la expresión de la ecuación exacta del desvío por la expresión  $c \cdot Z \cdot \text{sen} R$ , por lo tanto está inducida por la componente vertical del magnetismo terrestre y la polaridad dependerá del hemisferio magnético donde se encuentre el buque, siendo nula en el Ecuador magnético. Para el caso de una varilla “c” negativa en el Hemisferio Norte, la curva de desvíos resultante será la indicada a continuación.

$$\Delta c = \bar{c} \cdot Z \cdot \text{sen} R$$

$R = 0^\circ$	$\Delta c = 0$
$R = 090^\circ$	$\Delta c = -c \cdot Z$
$R = 180^\circ$	$\Delta c = 0$
$R = 270^\circ$	$\Delta c = c \cdot Z$

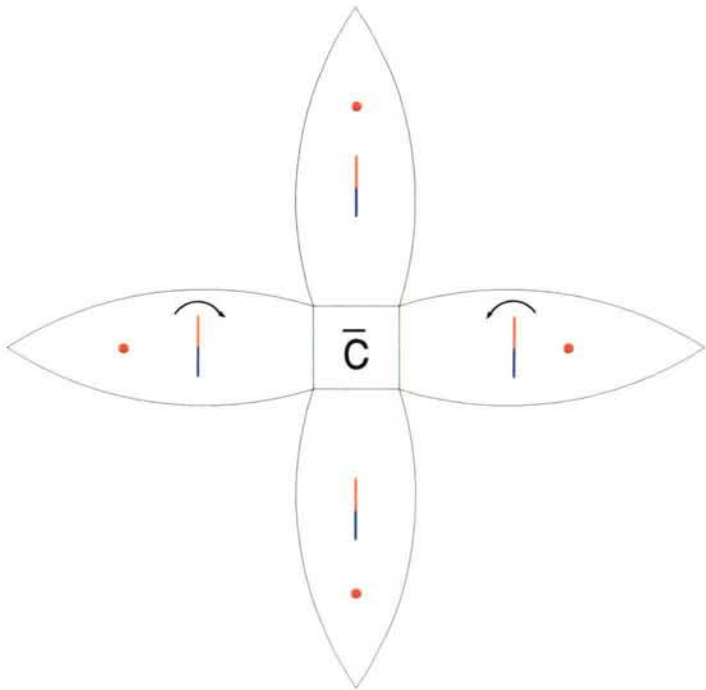
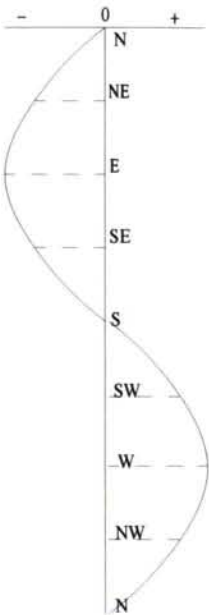


FIGURA II.29.- DESVÍO PRODUCIDO POR LA VARILLA “c (-)” H.N.

La curva resultante es de tipo semicircular con máximos a los rumbos 090° 270° y nula a los rumbos 0° y 180°.[MORE-72:128/134]



La varilla “g” no influye en la expresión del desvío con el buque adrizado; posteriormente se deducirá su expresión para el caso de estar el buque escorado [III.10],

donde figura en dos términos:  $\frac{c-g}{2\lambda}i$  por un lado y  $-\frac{c+g}{2\lambda}i \cdot \cos R$  por otro.

Agrupando estos dos términos, la expresión del desvío que origina la varilla “g” es la siguiente:

$$-\frac{g}{2\lambda}i - \frac{g}{2\lambda}i \cdot \cos 2R = -\frac{g}{2\lambda}i(1 + \cos 2R) = \frac{g}{\lambda}i \cdot \cos^2 R$$

La curva resultante de desvíos producidos por una varilla “g” positiva y escora a estribor, en la forma analítica y gráfica, será:

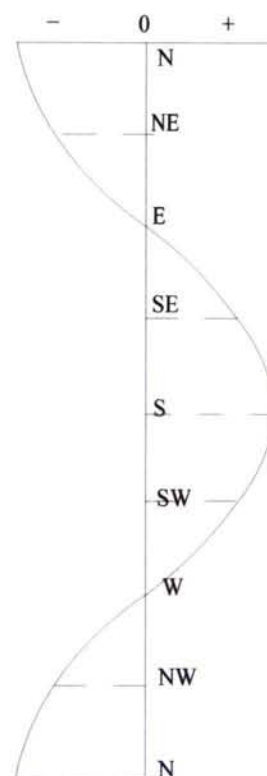
$$\Delta g = -\frac{g}{\lambda}i \cdot \cos^2 R$$

$$R = 0^\circ \quad \Delta g = -\frac{g}{\lambda}i$$

$$R = 090^\circ \quad \Delta g = 0$$

$$R = 180^\circ \quad \Delta g = -\frac{g}{\lambda}i$$

$$R = 270^\circ \quad \Delta g = 0$$



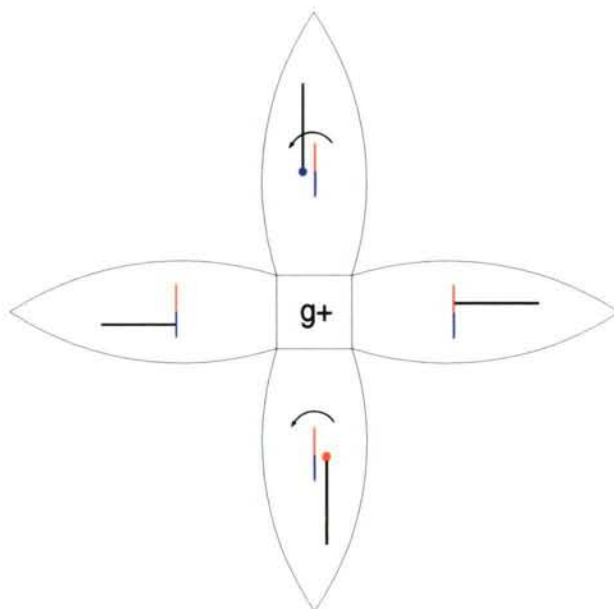


FIGURA II.30.- DESVÍO ANALÍTICO Y GRÁFICO DE LA VARILLA “g”

La curva resultante tiene los máximos, ambos negativos por ser función de  $\cos^2 R$ , a los rumbos  $0^\circ$  y  $180^\circ$  y su efecto es nulo a los rumbos  $090^\circ$  y  $270^\circ$ .

La varilla “k”, al igual que la anterior, no figura en la expresión del desvío con el buque adrizado y tan solo interviene con el buque escorado, siendo su expresión [III.10]

$$-\frac{k}{\lambda} i \cdot \operatorname{tg} \theta \cdot \cos R.$$

La varilla “k” es otra de las varillas intervinientes la investigación del cuerpo central de la presente Tesis Doctoral.

Para el caso de una varilla “k” positiva en el Hemisferio Norte magnético y escora a babor, la curva de desvíos es:

$$R = 0^\circ$$

$$\Delta k = -\frac{k}{\lambda}(-i) \cdot \operatorname{tg} \theta$$

$$R = 090^\circ \quad \Delta k = 0$$

$$R = 180^\circ$$

$$\Delta k = \frac{k}{\lambda}(-i) \cdot \operatorname{tg} \theta$$

$$R = 270^\circ \quad \Delta k = 0$$

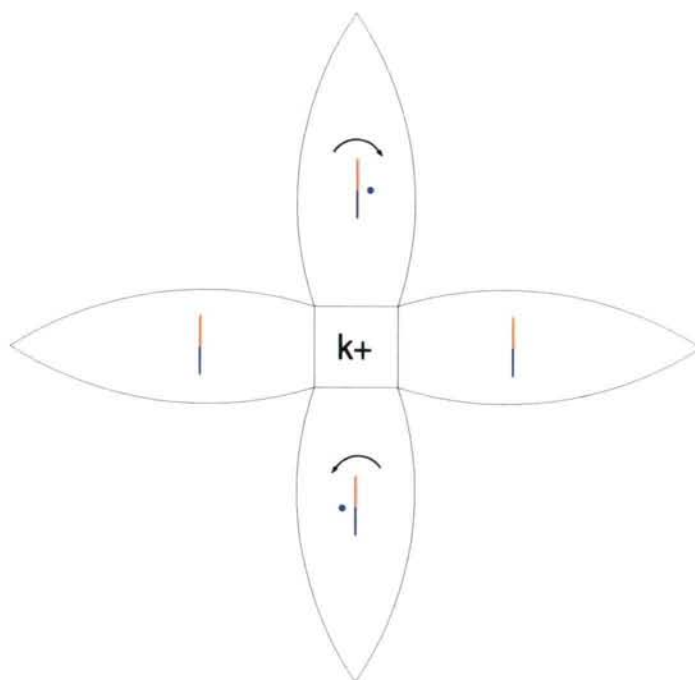
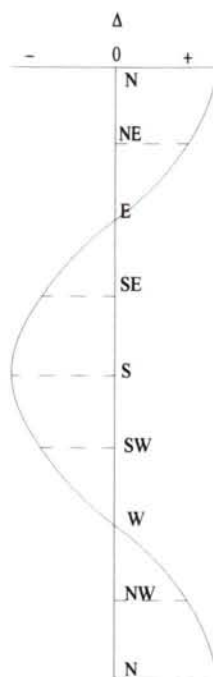


FIGURA II.31.- DESVÍO ANALÍTICO Y GRÁFICO DE LA VARILLA “k (+)” EN EL H.N.

La curva resultante, de tipo circular, tiene sus máximos a los rumbos  $0^\circ$  y  $180^\circ$  y se anula a los rumbos  $090^\circ$  y  $270^\circ$ .

## **5.- COMPENSACIÓN DE LOS IMANES Y VARILLAS INTERVINIENTES EN EL DESVÍO.**





## 5.1.- CORRECTORES EMPLEADOS EN LA COMPENSACIÓN

Para anular los desvíos producidos por los diversos imanes y varillas descritas con anterioridad, se utilizan correctores de hierro duro y hierro dulce respectivamente; hierros de la misma clase, que colocados a la distancia adecuada, ejercen un efecto igual y contrario a los hierros perturbadores del buque.

### 5.1.1.- CORRECTORES DE HIERRO DURO

Los correctores de hierro duro empleados en la compensación son los imanes permanentes, longitudinales, transversales y verticales.

Los imanes longitudinales y transversales son idénticos; sus dimensiones, en unidades inglesas, son:

- Longitud: 8 pulgadas.
- Diámetro: 3/8 de pulgada y 3/16 de pulgada.

El número de imanes que conforman un juego para las bitácoras de los buques mercantes es de 12 de 3/8" y 4 de 3/16", denominándose a estos últimos "pequeños" por ser su efecto cuatro veces menor que los imanes de 3/8".

La potencia de los imanes se expresa por los grados que desvío la aguja en Glasgow [RIBE-61:606] desde una distancia determinada y el conjunto de imanes facilitados debe de ser capaz de anular valores de los coeficientes B y C de hasta 40°.

Los imanes permanentes se comercializan pintados de la mitad de rojo (polaridad Norte) y la otra mitad de azul (polaridad Sur). Para su fabricación se emplean aleaciones de acero que proporcionen una gran retentividad. Con anterioridad se empleaban aleaciones de acero al tungsteno; en la actualidad se emplean imanes de acero al cobalto. Debido a que los imanes de cobalto desimantan a los de tungsteno, los primeros llevan pintada una franja verde en el centro para distinguirlos a fin de no emplearlos ni guardarlos juntos.

Los imanes verticales, de características similares a los anteriores, pero de longitud 9", se suministran en juegos de 7 unidades pero todos ellos de 3/8" de diámetro.

### 5.1.2.- CORRECTORES DE HIERRO DULCE.

Los correctores de hierro dulce empleados en la compensación son la barra Flinders y las esferas. La barra Flinders se emplea para corregir los efectos de la varilla “c” y “f” (si hubiese hierros asimétricos) y el material empleado tiene que ser de escasa remanencia y gran susceptibilidad magnética, a fin de acusar con rapidez los cambios de intensidad del campo magnético terrestre y su inducción. Para determinar su bondad en este aspecto se ha de comprobar que, colocada en toda su longitud, al invertir su posición, el desvío que provoca sobre la aguja sea  $\leq 1^\circ$  respecto a la posición primitiva.

La barra Flinders se suministra en trozos de 3” de diámetro y de longitudes variables a fin de combinar la longitud deseada. Un juego de barra Flinders consta de los siguientes trozos:

- 1 de 12”
- 1 de 6”
- 1 de 3”
- 1 de 1,5”
- 2 de 3/4”,

componiendo en su totalidad una longitud de 24”. Para que su ubicación quede en el contenedor de latón a partir del plano de las agujas hacia abajo en la longitud necesaria, se complementa el hueco con tacos de madera de idéntico diámetro y longitud variable.

Un equipo de tacos de madera consta de los siguientes trozos:

- 1 de 5,5”
- 1 de 2,75”
- 2 de 3/4”.

Las esferas, de hierro dulce de características similares a la barra Flinders, se comercializan de varios diámetros desde 2” a 12”, aumentando de una en una pulgada las inferiores a 6” y de media en media pulgada las superiores a dichas 6”. Otra particularidad de las esferas inferiores a 6” es que son macizas, mientras que las superiores son huecas. Obviamente, las esferas de las bitácoras de los buques mercantes se corresponden con las de mayor diámetro. En todo caso deben ser capaces de corregir

un coeficiente D con valor de hasta 14°. Como es necesario evitar que sean inducidas por el campo magnético creado por la aguja, su colocación debe de ser lo más alejadas posibles lo que implica la utilización de las de mayor diámetro para corregir un mismo desvío.

Las esferas tienen como misión corregir las varillas “a” y “e” del buque. Teniendo en cuenta que en un buque mercante las varillas “a” y “e” son negativas y que el valor de la varilla “e” es mayor que el de la varilla “a” (por tener los polos más cercanos a la aguja) la compensación del coeficiente D se efectúa modificando estos valores hasta igualarlos, según se desprende de la ecuación de dicho coeficiente:

$$D = \sin \delta = \frac{a - e}{2\lambda} \quad [\text{II.41}]$$

Para anular el coeficiente D, hay que aumentar el valor de  $\bar{a}$  y rebajar el valor de  $\bar{e}$  hasta igualarlos.

Una esfera ejerce la misma función que tres varillas iguales y perpendiculares entre sí. Cuando corrigen el desvío cuadrantal deberán estar colocadas de través, una a cada lado de la aguja (suponiendo que el valor del coeficiente D sea positivo, que constituye el caso habitual, en caso contrario las esferas estarán colocadas en sentido proa-popa). El centro de las esferas deben de quedar a la altura del plano de la aguja.

En la figura [II.32] se puede apreciar la sustitución física del efecto de la esfera hueca con respecto a las varillas que realmente representa.

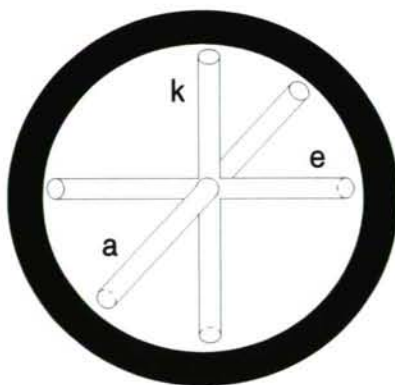


FIGURA II.32.- EFECTO DE UNA ESFERA HUECA

El el caso de estar colocadas en el sentido babor-estribor, las componentes corresponderían a:



- 1 varilla  $a_1$  negativa.
- 1 varilla  $e_1$  positiva y
- 1 varilla  $k_1$  negativa;

ésta última no ejerce influencia con el buque adrizado pero si cuando está escorado. El valor de las mismas es idéntico y el desvío corrector solamente depende de la distancia a que se coloquen de la aguja. Precisamente, el valor de la varilla correctora  $k_1$ , cuyo efecto se ignora en las bitácoras instaladas en los buques, será parte de la investigación de la presente Tesis.

### 5.3.- INSTALACIÓN DE LOS CORRECTORES.

Con independencia del orden de colocación, los correctores se deben instalar de la manera que a continuación se detalla para cada caso.

#### 5.3.1.- IMANES LONGITUDINALES Y TRANSVERSALES.

Los imanes longitudinales se colocan en la bitácora por parejas equidistantes a ambas bandas del plano longitudinal y de tal modo que el centro de los imanes esté en el plano vertical transversal que pasa por el centro de la aguja, es decir, que los extremos del imán equidisten del centro de la rosa.

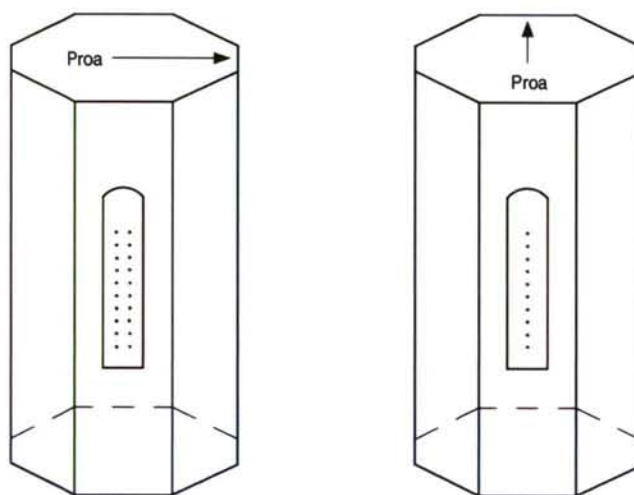


FIGURA II.33.- COLOCACIÓN DE IMANES EN LA BITÁCORA

Las casillas donde se introducen los imanes están numeradas de abajo hacia arriba mediante los dígitos siguientes: 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 16, 18, 20.



La distancia de la pareja de imanes más cercana, casilla nº 20, debe de estar alejada del centro de agujas al menos el doble de la longitud del imán para producir un campo magnético uniforme; por la misma razón, en caso de emplear dos o más parejas de imanes para compensar el desvío, se colocarán siempre lo más juntos y alejados posible.

### 5.3.2.- IMANES VERTICALES.

Los imanes verticales van alojados en un estuche de latón que discurre verticalmente en la bitácora en el eje del centro de la rosa. Se acciona la distancia mediante una cadena del mismo material; sus eslabones se pueden fijar en la parte superior para que el estuche quede a la distancia adecuada.

En las bitácoras de mayor tamaño, el estuche lleva 7 orificios para colocar hasta un máximo de 7 imanes verticales, cosa muy poco probable. Cuando no se empleen los siete imanes su disposición ha de ser tal que estén colocados de forma simétrica; si se emplea uno se coloca en el centro; 2 en cualquiera de los extremos, 3 en triángulo, 4 en cuadrado, 5 en cuadrado y otro en el centro y 6 en la periferia.

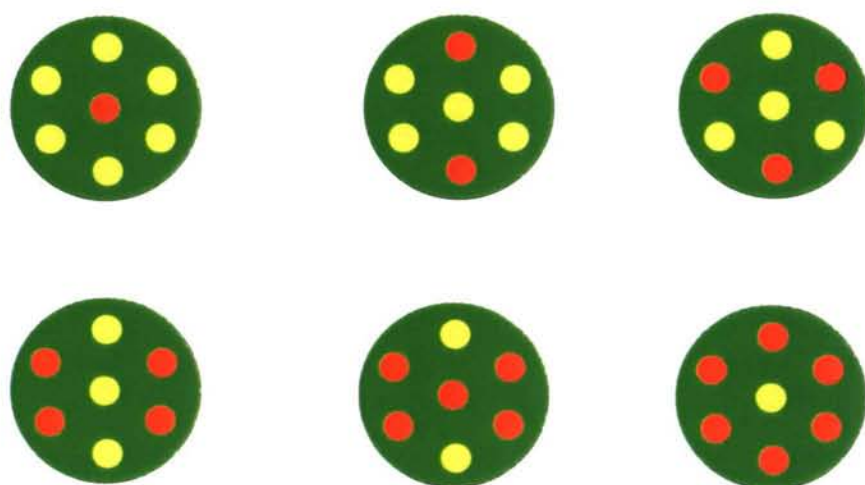


FIGURA II.34.- DISPOSICIÓN DE LOS IMANES VERTICALES. [MORE-76:168]

Todo el sistema debe de ser ajustable de forma que proporcione campos verticales de por lo menos  $\pm 0,75$  gauss.

### 5.2.3.- INSTALACIÓN DE LA BARRA FLINDERS.

La barra Flinders va alojada en un estuche vertical de latón y se afirma a la bitácora por la proa o por la popa en el plano longitudinal (suponiendo la no-existencia de varilla “f” que es lo normal).

La parte inferior del estuche va relleno de tacos de madera para que la barra quede colocada desde el plano de agujas hacia abajo. Teniendo en cuenta que los polos están aproximadamente a 1/12 de la longitud de la barra y que en ciertos casos se hace sentir la acción del polo lejano, la barra debe colocarse de tal manera que la resultante de ambos polos esté en el plano horizontal, por lo que se distinguen tres casos:

- a) Longitudes de barra superiores a 12 pulgadas; en este caso la acción del polo lejano no se deja sentir, por lo que el tope superior de la barra estará ligeramente por encima del plano de las agujas.

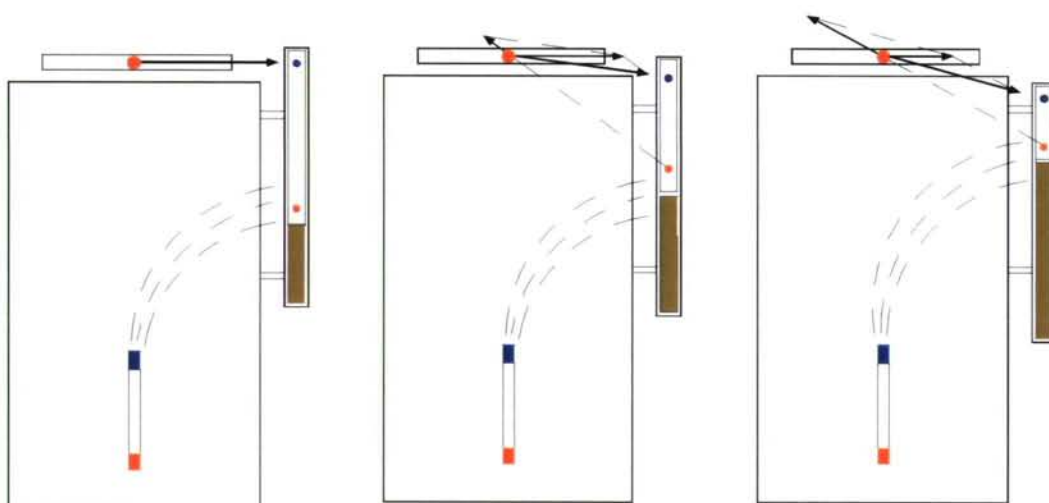


FIGURA II.35.- EFECTO SECUNDARIO DEL CORRECTOR DE ESCORA

- b) Para longitudes de barra entre 12” y 6”, el tope superior de la misma estará aproximadamente a la misma altura que el plano de agujas, pues ya se hace sentir la acción del polo lejano.
- c) Para longitudes de barra cortas, es decir, menores de 6”, el tope superior de la barra se colocará ligeramente por debajo del plano de las agujas debido a que la acción del polo lejano se hace sentir con más intensidad.

En todos los casos, tal como se observa en la figura [II.35], se intenta que la fuerza resultante esté en el plano horizontal y evitar la formación de una componente vertical que afectaría a la aguja en caso de navegar el buque escorado. [MORE-72:172]

#### 5.2.4.- INSTALACIÓN DE LAS ESFERAS.

Las esferas van montadas a ambos lados de la bitácora, en el plano transversal, sobre unos soportes de metal sobre los cuales se pueden deslizar y fijar. El soporte suele estar graduado para conocer la distancia al centro de la rosa, ya que las esferas deben de estar equidistantes de dicho punto. Es conveniente que la mínima distancia al centro de la rosa sea superior siempre a la longitud de la aguja más larga del sistema de agujas que están ubicadas en la rosa náutica, a fin de que el magnetismo de éstas no cree un campo inducido en la parte más cercana de las esferas. Por esta causa es conveniente utilizar esferas de mayor tamaño, que a igualdad de desvío a compensar, la distancia a que se deben colocar es mayor. [RIBE-61:608]

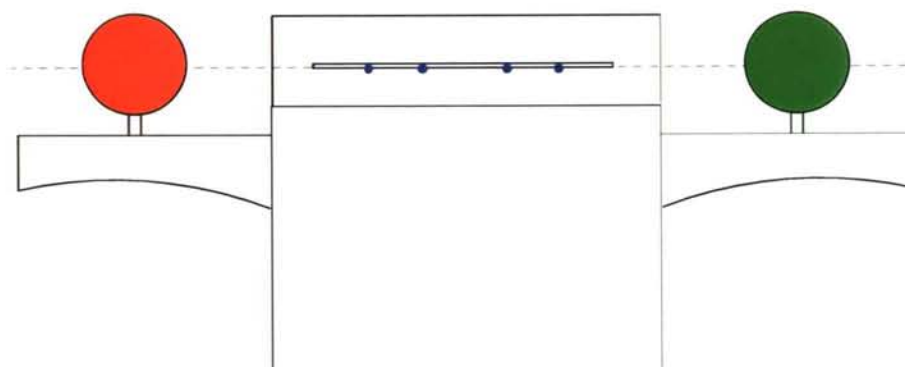


FIGURA II.36.- COLOCACIÓN DE LAS ESFERAS

Las esferas suelen ir pintadas de rojo y verde para no intercambiar la de babor con la de estribor. La causa de esta precaución reside en la posibilidad de existencia de algún polo de magnetismo permanente en las esferas, debido a la imposibilidad de asegurar un hierro dulce puro. Este posible magnetismo permanente se corrige con los imanes longitudinales y transversales; si una vez corregido se intercambiasen las esferas se originaría un desvío sobre la aguja.

Por la misma razón se debe evitar girarlas sobre sí mismas; algunas esferas, a fin de evitar este accidente llevan una marca a proa de las mismas.



### 5.3.- ORDEN DE COLOCACIÓN DE LOS CORRECTORES.

La influencia mutua ejercida entre los diversos correctores empleados en la compensación, debido a la proximidad entre ellos, obliga a establecer un orden colocación a fin de que los efectos secundarios sobre la aguja sean corregidos por los correctores posteriores.

Este orden, puramente teórico, no es aplicable en la práctica de la compensación por razones de oportunidad, lo que no es óbice para su exposición.

El orden correcto es el siguiente:

1. Barra Flinders.
2. Esferas.
3. Imanes verticales.
4. Imantes horizontales.

La barra Flinders anula el efecto de la varilla “c” pero, debido a la dimensión de su diámetro, genera en el plano horizontal una componente de varilla “a” y otra componente de varilla “e”. Como las varillas “a” y “e” se corrigen mediante las esferas, es necesario colocar la barra Flinders con anterioridad para corregir las citadas varillas del buque y de la barra.

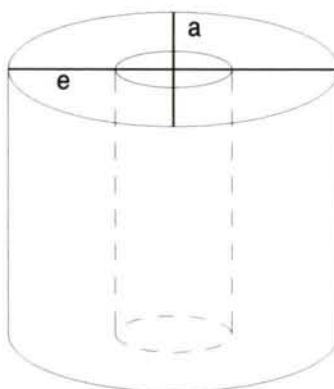


FIGURA II.37.- EFECTO SECUNDARIO DE LA BARRA FLINDERS

En segundo lugar se colocan las esferas, las cuales corrigen las varillas “a” y “e” del barco y de la barra Flinders mediante la adición de los valores  $a_1$  y  $e_1$  haciendo que

la resultante final sea igual a cero. No obstante, las esferas tienen un efecto adicional de varilla “-k” debido a sus dimensiones finitas en el plano vertical. Debido a que la varilla “k” se corrige mediante el corrector de escora, modificando el coeficiente  $\mu$  en  $\mu_2$ , de tal manera que  $\mu_2 = \lambda_2$  y  $\lambda_2$  se obtiene al anular el coeficiente D con esferas, éstas han de colocarse antes que el corrector de escora.

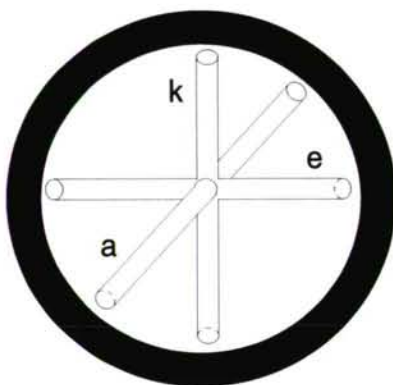


FIGURA II.38.- EFECTO ADICIONAL DE LAS ESFERAS

Los imanes verticales corrigen el efecto del imán R y de la varilla k, pero su posición cercana a la barra Flinders genera un campo magnético permanente que induce a la barra como un efecto de imán P. Esta circunstancia obliga a instalar el corrector de escora antes que los imanes horizontales para que éstos anulen el imán P y Q del buque y el P inducido en la barra Flinders (ver figura II.35).

Finalmente se instalan los imanes horizontales, siendo conveniente colocar en primer lugar aquellos que corrigen un valor mayor. [MORE-72:174/178]

#### 5.4.- COMPENSACIÓN DE LA AGUJA CON EL BUQUE ADRIZADO

Compensar la aguja significa anular los desvíos creados por el casco y superestructuras a todos los rumbos. Teóricamente se puede conseguir igualando el valor de la fuerza directriz a todos los rumbos mediante la utilización del desviador Kelvin, operación de una notable complejidad. En la práctica es más útil anular los coeficientes A, B, C, D, y E con lo que la ecuación del desvío queda anulada.



#### 5.4.1.- ANULACIÓN DEL COEFICIENTE A.

La existencia del coeficiente A puede ser debido a dos causas; la primera se debería a la deficiente instalación del mortero con la no-coincidencia, por lo tanto, de la línea de fe con el eje de crujía. La segunda causa se debería a la existencia de las varillas asimétricas “d” y “b” según las expresiones deducidas:

$$A = \frac{\alpha}{\sin l^\circ} \quad \alpha = \frac{d - b}{2\lambda} \quad [\text{II.42}]$$

En este segundo caso, y al no estar la ecuación del desvío afectada por el rumbo, se trata también de un desvío constante, por lo tanto la anulación del coeficiente A consiste en alinear convenientemente la línea de fe, en el primer caso, u orientar dicha línea de fe en sentido de anular los efectos de las varillas “d” y “b” contempladas en el segundo caso. En ambas hipótesis se trata de una operación mecánica que consiste en corregir un ángulo constante con otro de la misma naturaleza.

#### 5.4.2.- ANULACIÓN DEL COEFICIENTE B.

El coeficiente B deducido bajo la expresión  $B = \frac{\beta}{\sin l^\circ}$  depende del coeficiente exacto  $\beta$  cuya expresión deducida es:

$$\beta = \frac{P}{\lambda \cdot H} + \frac{c}{\lambda} \cdot \text{tg } \theta$$

Por lo tanto el coeficiente B depende del imán permanente P y de la varilla “c”. Al tratarse de hierros de diferente especie, su anulación ha de conseguirse empleando correctores adecuados; para el imán permanente P se emplean imanes longitudinales de acero y para la varilla de hierro dulce “c” con hierro dulce de la misma especie, es decir, la barra Flinders.

Por todo lo anterior, el primer paso consiste en calcular la parte de imán que contiene B ( $B_p$ ) y la parte de varilla ( $B_c$ );

$$B = B_p + B_c \quad [\text{II.43}]$$

El imán permanente P permanece invariable, pero su efecto sobre la aguja es proporcional a  $1/H$ .

La varilla “c” está inducida por Z, componente vertical del magnetismo terrestre, y también por  $1/H$ ; analizando ambos términos se observa que  $B_p$  y  $B_c$  varían en manera distinta con el cambio de posición geográfica, más explícitamente, con el cambio de latitud.

Deduciendo, por lo tanto, el valor de B en dos lugares de valores de Z claramente diferenciados, se deducen ambos valores  $B_p$  y  $B_c$  separadamente.

En efecto:

$$B = \frac{\beta}{\sin l^\circ}; \quad \beta = B \cdot \sin l^\circ = \sin B$$

$$\beta = \frac{P}{\lambda \cdot H} + \frac{c}{\lambda} \cdot \frac{Z}{H}; \quad \text{por lo tanto,}$$

$$\sin B = \frac{P}{\lambda \cdot H} + \frac{c}{\lambda} \cdot \frac{Z}{H}$$

En un primer lugar de valores Z y H.

$$\sin B = \frac{P}{\lambda \cdot H} + \frac{c}{\lambda} \cdot \frac{Z}{H}$$

En un segundo lugar de valores Z' y H'

$$\sin B' = \frac{P}{\lambda \cdot H'} + \frac{c}{\lambda} \cdot \frac{Z'}{H'}; \quad \text{de ambas ecuaciones se deduce,}$$

$$\lambda \cdot H \cdot \sin B = P + c \cdot Z$$

$$\lambda \cdot H' \cdot \sin B' = P + c \cdot Z'$$

Restando ambas se anula P, quedando el valor de “c” de la siguiente forma:

$$c = \frac{H \cdot \sin B - H' \cdot \sin B'}{Z - Z'} \quad [\text{II.44}]$$

Conocido el valor de “c” se obtiene  $B_c$  según:

$$B_c = \frac{c}{\lambda} \cdot \frac{Z'}{H'} \text{ (en rad.)} \quad \text{ó} \quad B_c = \frac{c}{\lambda} \cdot \frac{Z'}{H'} \cdot 57^\circ,3 \text{ (en grados)}$$

y por lo tanto

$$B_p = B' - B_c \quad [\text{II.45}]$$

#### 5.4.3.- ANULACIÓN DEL COEFICIENTE C.

El coeficiente aproximado C depende del exacto  $\gamma$  según las expresiones ya deducidas.

$$C = \frac{\gamma}{\text{sen } 1^\circ} \quad \gamma = C \cdot \text{sen } 1^\circ \approx \text{sen } C$$

y como

$$\gamma = \frac{Q}{\lambda \cdot H} + \frac{f}{\lambda} \cdot \frac{Z}{H} \quad \text{resulta,}$$

$$\text{sen } C = \frac{Q}{\lambda \cdot H} + \frac{f}{\lambda} \cdot \frac{Z}{H}$$

Al igual que en el caso anteriormente expuesto, el coeficiente C consta de dos partes, una debido al imán permanente Q y otra a la varilla asimétrica “f”; por lo tanto,

$$C = C_Q + C_f \quad [\text{II.46}]$$

Estableciendo los valores de C para dos lugares geográficos de valores de Z significativamente diferentes, se obtiene:

$$\text{sen } C = \frac{Q}{\lambda \cdot H} + \frac{f}{\lambda} \cdot \frac{Z}{H} \quad \text{y,}$$

$$\text{sen } C' = \frac{Q}{\lambda \cdot H'} + \frac{f}{\lambda} \cdot \frac{Z'}{H'}$$

Restando ambas ecuaciones y despejando el valor de “f”,

$$f = \frac{H \cdot \text{sen } C - H' \cdot \text{sen } C'}{Z - Z'}$$

y por consiguiente, [SUBS-72]

$$C_f = \frac{f}{\lambda} \cdot \frac{Z'}{H'} \quad (\text{en rad.}) \quad \text{ó} \quad C_f^\circ = \frac{f}{\lambda} \cdot \frac{Z'}{H'} \cdot 57^\circ,3$$

$$\text{El valor de } C_Q \text{ será:} \quad C_Q = C' - C_f \quad [\text{II.47}]$$

#### 5.4.4.- ANULACIÓN DE LOS COEFICIENTES D y E.

Los coeficientes D y E se corrigen conjuntamente a los rumbos cuadrantales donde su valor es máximo, según [II.37]

$$\Delta_{\text{cuad. max.}} = \sqrt{D^2 + E^2}$$

y girando las esferas un ángulo expresado por  $\text{tg } 2W' = \frac{E}{D}$  [RIBE-61:619]

La justificación del empleo de esferas queda explicado en el Capítulo IV.





### **CAPÍTULO III.- INCIDENCIA DE LAS NUEVAS FUERZAS QUE ORIGINAN EL DEVÍO DE ESCORA Y SU ANULACIÓN**



## **1.- EL DESVÍO DE ESCORA**





### 1.1.- DESVÍO DE ESCORA.

Se entiende por desvío de escora ( $\Delta_e$ ) *el cambio que experimenta el desvío al escorarse el buque.*

Por lo tanto se trata de la diferencia entre el desvío de la aguja con el buque escorado y el correspondiente al mismo rumbo con el buque adrizado:

$$\Delta_e = \Delta_i - \Delta_a \quad [\text{III.1}]$$

con:  $\Delta_e$ : desvío de escora.

$\Delta_i$ : desvío con el buque escorado.

$\Delta_a$ : desvío con el buque adrizado.

Para el estudio del desvío de escora se asume que:

- a) Al escorarse el buque, la aguja permanece horizontal debido a la suspensión Cardan.
- b) Que el imán permanente cambia de dirección con respecto a la aguja.
- c) Que el imán accidental cambia de dirección con respecto a la aguja y de intensidad al variar su posición dentro del campo magnético terrestre.
- d) Que el buque gira alrededor del eje longitudinal X que permanece invariable, mientras que los ejes transversal y vertical giran un ángulo igual a la escora ( $i^\circ$ ), considerando “i” positivo a estribor y negativo a babor.
- e) Considerando que el ángulo de escora será menor de  $15^\circ$  (se trata de escoras permanentes) se pueden suponer las siguientes aproximaciones:

$$\text{sen } i \approx i \text{ rad.}$$

$$\text{cos } i \approx 1$$

$$\text{sen}^2 i = 0$$

$$\text{cos}^2 i = 1$$

- f) Que las varillas asimétricas “b”, “d”, “f” y “h” ejercen un escaso valor por lo que se puede prescindir del efecto de las mismas.

### 1.1.1.- FUERZAS QUE ORIGINAN EL DESVÍO DE ESCORA; ESTUDIO PORMENORIZADO PARA LOS IMANES PERMANENTES P, Q y R.

Se deben encontrar aquellas fuerzas que ejercen un efecto no existente cuando el barco se hallaba adrizado.

*Imán P:* permanece invariable por estar en el eje X, por lo tanto no produce ningún efecto nuevo.

*Imán Q:* da lugar a una componente horizontal y una componente vertical, que no se considera.

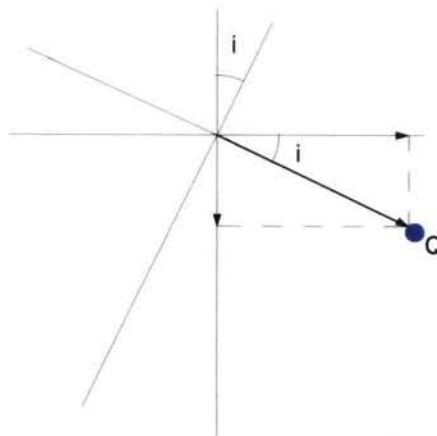


FIGURA III.1.- COMPONENTES DEL IMÁN Q CON LA ESCORA

*Imán R:* la acción de este imán ha dejado de ser vertical y da lugar a la aparición de una fuerza horizontal.

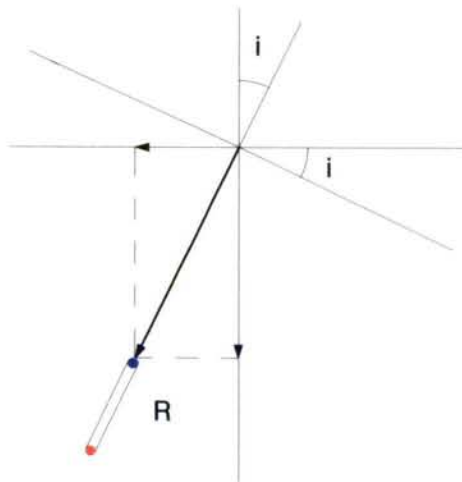


FIGURA III.2.- ACCIÓN DEL IMÁN R CON LA ESCORA

La expresión de las fuerzas originadas por Q y R es:

$$\begin{bmatrix} F_Q \\ F_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos i & 0 \\ 0 & -\sin i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q \\ R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q \cos i \\ -R \sin i \end{bmatrix}$$

Teniendo en cuenta que:

$$Q \cdot \cos i \approx Q \cdot 1 = Q$$

$$-R \cdot \sin i = -R i \quad [\text{III.2}]$$

La única fuerza nueva que aparece es  $-R.i$ . El signo “-” se justifica porque con “R” e “i” positivos el desvío producido es a babor. [CAPA-85:119]

### 1.1.2.- ESTUDIO PORMENORIZADO DE LAS FUERZAS QUE ORIGINAN EL DESVÍO DE ESCORA DEBIDO A LAS VARILLAS “a”, “g”, “e”, “c” y “k”.

Antes de entrar en el estudio de las varillas es necesario estudiar las nuevas fuerzas inductoras del campo magnético terrestre, cuya dirección con respecto a las varillas del buque habrá cambiado.

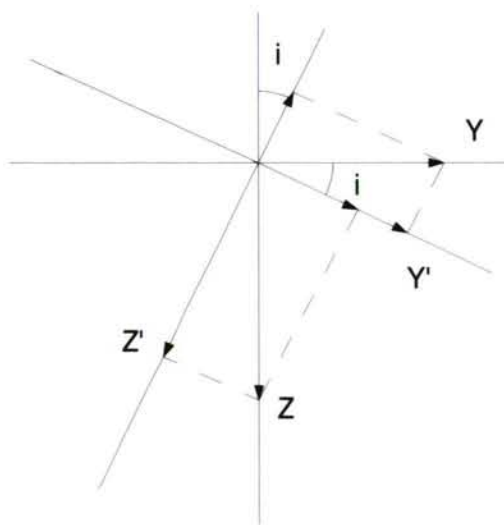


FIGURA III.3.- FUERZAS INDUCTORAS

$$\left. \begin{aligned} \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos i & \operatorname{sen} i \\ 0 & -\operatorname{sen} i & \cos i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} X' &= X \\ Y' &= Y \cdot \cos i + Z \cdot \operatorname{sen} i \\ Z' &= -Y \cdot \operatorname{sen} i + Z \cdot \cos i \end{aligned}$$

Estas nuevas fuerzas inducen a las varillas que se encuentren en su dirección.

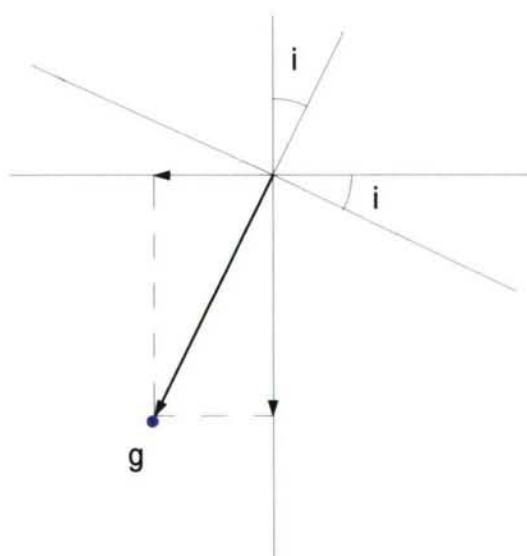
En el eje X' se encuentran las varillas "a" y "g".

En el eje Y' se encuentra la varilla "e".

En el eje Z' se encuentran las varillas "c" y "k".

*Varilla "a":* Permanece invariable por estar en el eje invariable  $X'=X$ .

*Varilla "g":* La intensidad ejercida por esta varilla permanece invariable por estar en el eje X pero cambia de posición con respecto a la aguja produciendo una nueva fuerza en el eje transversal.



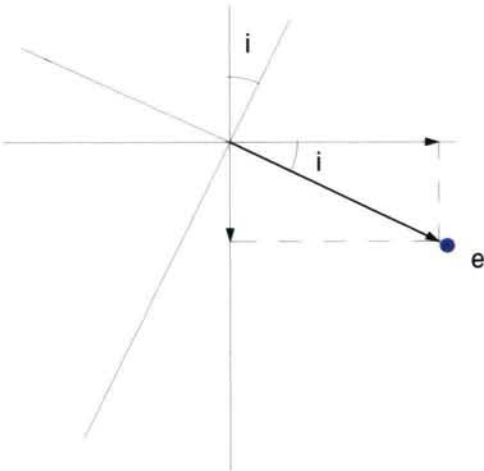
$$F'_g = -g X' \operatorname{sen} i$$

FIGURA III.4.- ACCIÓN DE LA VARILLA "g"

*Varilla "e":* Cambia de intensidad al estar inducida por Y' y de dirección con



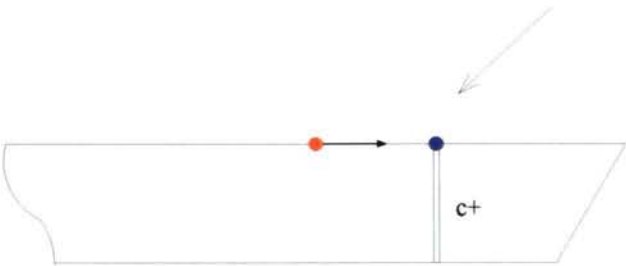
respecto a la aguja, dando lugar a una nueva fuerza transversal.



$$F'_e = e Y' \cos i$$

FIGURA III.5.- ACCIÓN DE LA VARILLA “e”

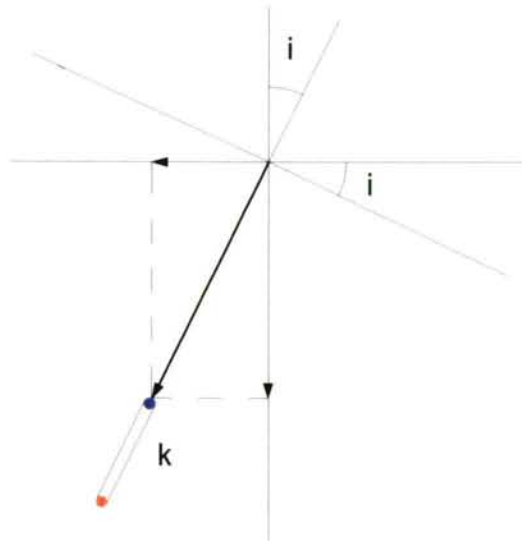
*Varilla “c”:* No cambia de dirección por ser la del eje invariable X, pero sí de intensidad por estar ahora inducida por Z’, originando una nueva fuerza en el plano longitudinal.



$$F'_c = c Z'$$

FIGURA III.6.- ACCIÓN DE LA VARILLA “c”

*Varilla “k”:* La acción de esta varilla cambia de intensidad por estar ahora inducida por Z’ y de dirección con respecto a la aguja dando lugar a una nueva fuerza transversal.



$$F'_k = -k Z' \text{sen } i$$

FIGURA III.7.- ACCIÓN DE LA VARILLA “k”

La expresión de las fuerzas originadas por las varillas citadas son:

$$\begin{bmatrix} F'_g \\ F'_e \\ F'_c \\ F'_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -g \cdot \text{sen } i & 0 & 0 \\ 0 & e \cdot \text{cos } i & 0 \\ 0 & 0 & c \\ 0 & 0 & -k \cdot \text{sen } i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} -g \cdot \text{sen } i & 0 & 0 \\ 0 & e \cdot \text{cos } i & 0 \\ 0 & 0 & c \\ 0 & 0 & -k \cdot \text{sen } i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \text{cos } i & \text{sen } i \\ 0 & -\text{sen } i & \text{cos } i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} -g \cdot \text{sen } i & 0 & 0 \\ 0 & e \cdot \text{cos}^2 i & e \cdot \text{cos } i \cdot \text{sen } i \\ 0 & -c \cdot \text{sen } i & c \cdot \text{cos } i \\ 0 & k \cdot \text{sen}^2 i & -k \cdot \text{sen } i \cdot \text{cos } i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$

$$F'_g = -g \cdot \text{sen } i \cdot X = -g \cdot X i$$

[III.3]

$$F'_e = e \cdot \cos^2 i \cdot Y + e \cdot \cos i \cdot \sen i \cdot Z = e \cdot Y + e \cdot Z i \quad [\text{III.4}]$$

$$F'_c = c(-\sen i \cdot Y + \cos i \cdot Z) = -c \cdot Y i + c \cdot Z \quad [\text{III.5}]$$

$$F'_k = k(-\sen^2 i \cdot Y + \sen i \cdot \cos i \cdot Z) = -k \cdot Z i \quad [\text{III.6}]$$

### 1.1.3.- FUERZAS DIRECTRICES Y PERTURBADORAS GENERADAS POR LA ESCORA DEL BARCO.

Se observa que al escorarse el buque aparecen cinco fuerzas que no actuaban con el buque adrizado:  $-R \cdot i$ ,  $-g \cdot X \cdot i$ ,  $e \cdot Z \cdot i$ ,  $-c \cdot Y \cdot i$ ,  $-k \cdot Z \cdot i$ , cuatro en el eje transversal del buque y una en el eje longitudinal. Estas nuevas fuerzas son las que provocan el desvío de escora. Trasladándolas a los ejes N/S y E/W se obtiene: [MOLI-59:119]

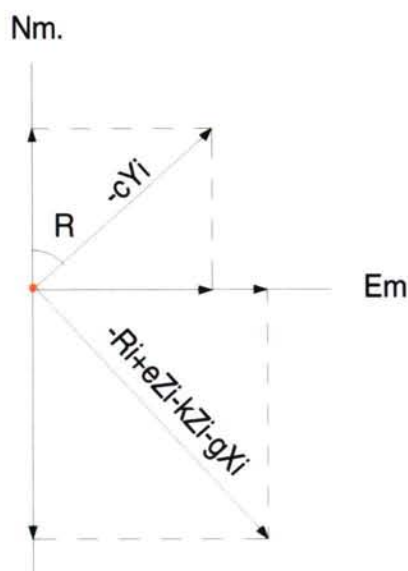


FIGURA III.8.- PROYECCIÓN DE LAS NUEVAS FUERZAS

$$F'_N = -c \cdot Y i \cdot \cos R - [-R i + e \cdot Z i - k \cdot Z i - g \cdot X i] \sen R$$

teniendo en cuenta que:

$$X = H \cdot \cos R$$

$$Y = -H \cdot \sen R$$

$$F'_N = c \cdot H i \cdot \sen R \cdot \cos R - [-R + (e - k)Z] i \cdot \sen R + g \cdot H i \cdot \sen R \cdot \cos R$$

$$F'_N = -[-R + (e - k)Z] i \cdot \text{sen} R + \frac{c + g}{2} \cdot Hi \cdot \text{sen} 2R \quad [\text{III.7}]$$

$$F'_E = -c \cdot Yi \cdot \text{sen} R + (-R i + e \cdot Zi - k \cdot Zi - g \cdot Xi) \cos R$$

$$F'_E = c \cdot Hi \cdot \text{sen}^2 R + [-R + (e - k) \cdot Z] i \cdot \cos R - g \cdot Hi \cdot \cos^2 R$$

$$F'_E = c \cdot Hi \frac{1 - \cos 2R}{2} [-R + (e - k) \cdot Z] i \cdot \cos R - g \cdot Hi \frac{1 + \cos 2R}{2}$$

$$F'_E = \frac{c - g}{2} Hi + [-R + (e - k) \cdot Z] i \cdot \cos 2R - \frac{c + g}{2} Hi \cdot \cos 2R \quad [\text{III.8}]$$

Las expresiones [III.7] y [III.8] son las nuevas fuerzas directrices y perturbadoras que aparecen al escorarse el buque.

## 1.2.- ECUACIÓN EXACTA DEL DESVÍO DE ESCORA CON EL BUQUE ESCORADO.

Si a las ecuaciones de la fuerza directriz y perturbadora con el buque adrizado las sumamos las mismas con el buque escorado, despreciando los términos de las varillas asimétrica “d”, “b”, “f” y “h”, se obtiene:

$$\left. \begin{aligned} F_N &= \lambda \cdot H + (P + c \cdot Z) \cos R - Q \cdot \sin R + \frac{a-e}{2} H \cos 2R \\ F'_N &= -[-R + (e-k)Z]i \cdot \sin R + \frac{c+g}{2} Hi \cdot \sin 2R \end{aligned} \right\}$$

$$\begin{aligned} F'_{2N} &= \lambda \cdot H + (P + c \cdot Z) \cos R - \left[ \frac{Q}{i} - R + (e-k)Z \right] i \cdot \sin R + \\ &+ \frac{a-e}{2} H \cdot \cos 2R + \frac{c+g}{2} Hi \cdot \sin 2R \end{aligned} \quad [\text{III.9}]$$

$$\left. \begin{aligned} F_E &= (P + c \cdot Z) \sin R + Q \cdot \cos R + \frac{a-e}{2} H \cdot \sin 2R \\ F'_E &= \frac{c-g}{2} Hi + [-R + (e-k)Z]i \cdot \cos R - \frac{c+g}{2} Hi \cdot \cos 2R \end{aligned} \right\}$$

$$\begin{aligned} F'_{2E} &= \frac{c-g}{2} Hi + (P + cZ) \sin R + \left[ \frac{Q}{i} - R + (e-k)Z \right] i \cos R + \\ &+ \frac{a-e}{2} H \sin 2R - \frac{c+g}{2} Hi \cdot \cos 2R \end{aligned} \quad [\text{III.10}]$$

Estas fuerzas directrices y perturbadoras dan lugar a una resultante  $H_2'$  que forma con el meridiano un ángulo  $\Delta i$  [SUBS-72]



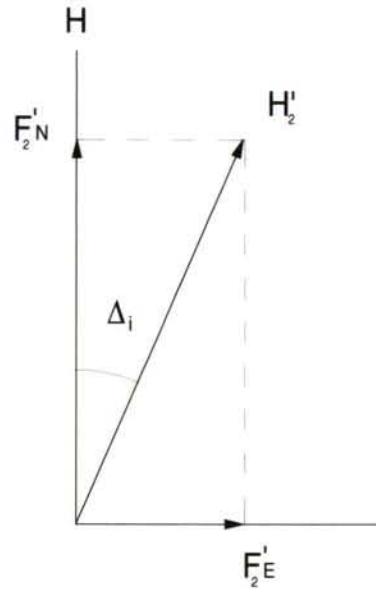


FIGURA III.9.- DESVÍO CON EL BUQUE ESCORADO

De la figura anterior se obtiene:

$$F_2 N = H'_2 \cdot \cos \Delta i \quad [\text{III.11}]$$

$$F_2 E = H'_2 \cdot \sen \Delta i \quad [\text{III.12}]$$

dividiendo ambas expresiones por  $\lambda H$

$$\frac{F_2 N}{\lambda H} = \frac{H'_2}{\lambda H} \cos \Delta i$$

$$\frac{F_2 E}{\lambda H} = \frac{H'_2}{\lambda H} \sen \Delta i$$

$$\begin{aligned} \frac{F_2 N}{\lambda H} = & 1 + \left( \frac{P}{\lambda H} + \frac{c}{\lambda} \operatorname{tg} \theta \right) \cos R - \left( \frac{Q - R i}{\lambda H} + \frac{e - k}{\lambda} i \operatorname{tg} \theta \right) \sen R + \\ & + \frac{a - e}{2\lambda} \cos 2R + \frac{c + g}{2\lambda} i \cdot \sen 2R \end{aligned} \quad [\text{III.13}]$$

Nominando

$$\frac{Q - Ri}{\lambda H} + \frac{e - k}{\lambda} i \cdot \operatorname{tg} \theta = \gamma_1 \quad [\text{III.14}]$$

$$\frac{c - g}{2\lambda} i = \alpha_1 \quad [\text{III.15}]$$

$$\frac{c + g}{2\lambda} i = \varepsilon_1 \quad [\text{III.16}]$$

como nuevos coeficiente exactos y sustituyendo:

$$\frac{F_2 N}{\lambda H} = 1 + \beta \cdot \cos R - \gamma_1 \cdot \sin R + \delta \cdot \cos 2R + \varepsilon_1 \cdot \sin 2R \quad [\text{III.17}]$$

Repetiendo el proceso anterior en [III.10]:

$$\begin{aligned} \frac{F_{2E}}{\lambda H} = & \frac{c - g}{2\lambda} i + \left( \frac{P}{\lambda H} + \frac{e - k}{\lambda} \operatorname{tg} \theta \right) \sin R + \left[ \frac{Q - Ri}{\lambda H} + \frac{e - k}{\lambda} i \operatorname{tg} \theta \right] \cos R + \\ & + \frac{a - e}{2\lambda} \sin 2R - \frac{c + g}{2\lambda} i \cdot \cos 2R \end{aligned} \quad [\text{III.18}]$$

Sustituyendo las expresiones de los coeficientes exactos, resulta:

$$\frac{F_2 E}{\lambda H} = \alpha_1 + \beta \cdot \sin R + \gamma_1 \cos R + \delta \cdot \sin 2R - \varepsilon_1 \cdot \cos 2R \quad [\text{III.19}]$$

[RIBE-61:568]

Dividiendo las expresiones [III.17], [III.19] y sustituyendo los valores anteriores:

$$\operatorname{tg} \Delta i = \frac{\frac{F_2 E}{\lambda H}}{\frac{F_2 N}{\lambda H}} = \frac{\alpha_1 + \beta \cdot \sin R + \gamma_1 \cdot \cos R + \delta \cdot \sin 2R - \varepsilon_1 \cdot \cos 2R}{1 + \beta \cdot \cos R - \gamma_1 \cdot \sin R + \delta \cdot \cos 2R + \varepsilon_1 \cdot \sin 2R} \quad [\text{III.20}]$$

La expresión anterior toma el nombre de ecuación exacta del desvío de escora con el buque escorado.

### 1.2.1.- ECUACIÓN APROXIMADA DEL DESVÍO DE ESCORA CON EL BUQUE ESCORADO.

La ecuación exacta del desvío con el buque escorado se puede expresar bajo la forma:

$$\frac{\sin \Delta i}{\cos \Delta i} = \frac{\alpha_1 + \beta \cdot \sin R + \gamma_1 \cdot \cos R + \delta \cdot \sin 2R - \varepsilon_1 \cdot \cos 2R}{1 + \beta \cdot \cos R - \gamma_1 \cdot \sin R + \delta \cdot \cos 2R + \varepsilon_1 \cdot \sin 2R} \quad [\text{III.21}]$$

Quitando denominadores y sacando factor común:

$$\begin{aligned} \sin \Delta i &= \alpha_1 \cdot \cos \Delta i + \beta (\sin R \cdot \cos \Delta i - \cos R \cdot \sin \Delta i) + \gamma_1 (\cos R \cdot \cos \Delta i - \sin R \cdot \sin \Delta i) = \\ &+ \delta (\sin 2R \cdot \cos \Delta i - \cos 2R \cdot \sin \Delta i) - \varepsilon_1 (\cos 2R \cdot \cos \Delta i + \sin 2R \cdot \sin \Delta i) \\ \sin \Delta i &= \alpha \cdot \cos \Delta i + \beta \cdot \sin(R - \Delta i) + \gamma_1 \cdot \cos(R - \Delta i) + \\ &+ \delta \cdot \sin(2R - \Delta i) - \varepsilon_1 \cos(2R - \Delta i) \end{aligned} \quad [\text{III.22}]$$

Poniendo la ecuación anterior en función del rumbo de aguja ( $R_a$ ):

$$\begin{aligned} R &= R_a + \Delta i; & R_a &= R - \Delta i \\ 2R_a &= 2R - 2\Delta i; & 2R_a + \Delta i &= 2R - \Delta i \end{aligned}$$

y sustituyendo:

$$\sin \Delta i = \alpha_1 \cdot \cos \Delta i + \beta \cdot \sin R_a + \gamma_1 \cdot \cos R_a + \delta \cdot \sin(2R_a + \Delta i) - \varepsilon_1 \cos(2R_a - \Delta i) \quad [\text{III.23}]$$

Al igual que en el desvío con el buque adrizado, considerando que el desvío no es un valor angular grande, se pueden hacer las sustituciones:

$$\sin \Delta i = \Delta i \cdot \sin 1^\circ$$

$$\cos \Delta i = 1$$

$$\sin(2R_a + \Delta i) \approx \sin 2R_a$$

$$\cos(2R_a + \Delta i) \approx \cos 2R_a$$

con lo que,

$$\Delta i = \frac{\alpha_1}{\sin 1^\circ} + \frac{\beta}{\sin 1^\circ} \cdot \sin R_a + \frac{\gamma_1}{\sin 1^\circ} \cdot \cos R_a + \frac{\delta}{\sin 1^\circ} \cdot \sin 2R_a - \frac{\varepsilon_1}{\sin 1^\circ} \cdot \cos 2R_a \quad [\text{III.24}]$$

Poniendo las expresiones anteriores bajo los coeficientes aproximados:

$$A_1 = \frac{\alpha_1}{\text{sen } 1^\circ}$$

$$B = \frac{\beta}{\text{sen } 1^\circ}$$

$$C_1 = \frac{\gamma_1}{\text{sen } 1^\circ}$$

$$D = \frac{\delta}{\text{sen } 1^\circ}$$

$$E_1 = \frac{\varepsilon_1}{\text{sen } 1^\circ}$$

la ecuación aproximada del desvío con el buque escorado será:

$$\Delta_i = A_1 + B \cdot \text{sen } R_a + C_1 \cdot \cos R_a + D \cdot \text{sen } 2R_a - E_1 \cdot \cos 2R_a \quad [\text{III.25}]$$

### 1.2.2.- ECUACIÓN APROXIMADA DEL DESVÍO DE ESCORA.

Se definió el desvío de escora como la diferencia de desvíos con el buque escorado y adrizado al mismo rumbo:

$$\Delta_e = \Delta_i - \Delta_a$$

$$\Delta_e = A_1 + B \cdot \text{sen } R_a + C_1 \cdot \cos R_a + D \cdot \text{sen } 2R_a - E_1 \cdot \cos 2R_a - \\ - (A + B \cdot \text{sen } R_a + C \cdot \cos R_a + D \cdot \text{sen } 2R_a + E \cdot \cos 2R_a)$$

$$\Delta_e = (A_1 - A) + (C_1 - C) \cos R_a - (E_1 - E) \cos 2R_a \quad [\text{III.26}]$$

Si se supone la no existencia de hierros asimétricos “d” y “b”, los coeficientes A y E serán cero, por lo que:

$$\Delta_e = A_1 + (C_1 - C) \cos R_a - E_1 \cdot \cos 2R_a \quad [\text{III.27}]$$

El valor de  $C_1 - C$  se puede poner bajo la forma:

$$C_1 - C = \frac{\gamma_1}{\text{sen } 1^\circ} - \frac{\gamma}{\text{sen } 1^\circ} = \left( \frac{Q - Ri}{\lambda H} + \frac{e - k}{\lambda} i \cdot \text{tg } \theta \right) \frac{1}{\text{sen } 1^\circ} - \frac{Q}{\lambda H} \frac{1}{\text{sen } 1^\circ}$$

$$C_1 - C = \left( \frac{-Ri}{\lambda H} + \frac{e-k}{\lambda} i \cdot \operatorname{tg} \theta \right) \frac{1}{\operatorname{sen} l^\circ}$$

Pero como “ $i$ ” está expresado en radianes, al dividirlo por el  $\operatorname{sen} l^\circ$  vendrá expresado en grados; a la expresión encerrada en el paréntesis se le da el nombre de coeficiente  $J$ ; por lo tanto:

$$C_1 - C = Ji$$

con lo que resulta:

$$\Delta_e = A_1 + Ji \cdot \cos R_a - E_1 \cdot \cos 2R_a \quad [\text{III.28}]$$

Los coeficientes  $A_1$  y  $E_1$  dependen de las varillas “ $c$ ” y “ $g$ ”; se considera el buque compensado de barra Flinders, el valor de “ $c$ ” será cero. En cuanto a la varilla “ $g$ ” su valor a bordo de los buques mercantes es próximo a cero, por lo que también se puede despreciar.

De todo lo anterior resulta:

$$\Delta_e = J \cdot i \cdot \cos R_a \quad [\text{III.29}]$$

[SUBS-72]



## **2.- COMPENSACIÓN DEL DESVÍO DE ESCORA**



## 2.1.- COEFICIENTE J.

Para anular el desvío de escora es necesario hacer  $J=0$ , por lo que debe calcularse previamente.

El coeficiente reseñado se compone de dos partes:

$$J = \frac{-R}{\lambda H} + \frac{e-k}{\lambda} \operatorname{tg} \theta$$

Una parte de magnetismo permanente, debido al imán R y otra parte de magnetismo accidental debido a las varillas “e” y “k”.

De forma similar al modo operativo con el buque adrizado para los coeficientes B y C, el método consiste en calcular el  $\Delta_e$  mediante su valor en dos lugares de H y Z sustancialmente diferentes:

La expresión de J para un lugar de H y Z conocidos será :

$$\lambda \cdot H \cdot J = -R + (e - k)Z$$

Para un segundo lugar de H' y Z' también conocidos:

$$\lambda \cdot H' \cdot J' = -R + (e - k)Z'$$

Restando ambas expresiones y despejando se tiene:

$$e - k = \lambda \frac{H \cdot J - H' \cdot J'}{Z - Z'} \quad [\text{III.30}]$$

Por lo tanto, la parte del coeficiente J debida al magnetismo accidental será:

$$\frac{e - k}{\lambda} = \frac{JH - J'H'}{Z - Z'} \quad [\text{III.31}]$$

y la del permanente:

$$-\frac{R}{\lambda} = H' \cdot J' - \frac{e - k}{\lambda} Z' \quad [\text{III.32}]$$

Conocidos  $\frac{e - k}{\lambda}$  y  $-\frac{R}{\lambda}$  se puede calcular el valor del desvío de escora en cualquier otro lugar de componentes H'' y Z''.

$$\Delta''_e = \frac{-R}{\lambda \cdot H''} + \frac{e - k}{\lambda} \frac{Z''}{H''} \quad [\text{III.33}]$$

### 2.1.1.- EXPRESIÓN DE LA FUERZA VERTICAL MEDIA; FACTORES “μ” Y “μ<sub>2</sub>”.

Sobre la aguja actúan tres fuerzas en el eje vertical, la componente Z del magnetismo terrestre, la componente R del magnetismo permanente y la componente vertical del magnetismo accidental debido a las varillas “g”, “h” y “k” cuya expresión deducida es:

$$g \cdot H \cdot \cos R - h \cdot H \cdot \sin R + k \cdot Z$$

Por lo tanto la expresión de la fuerza vertical con el buque adrizado será:  
[DENN-79:99]

$$z = g \cdot H \cdot \cos R - h \cdot H \cdot \sin R + k \cdot Z + R + Z \quad [\text{III.34}]$$

Estableciendo la ecuación anterior a una serie de rumbos equidistantes, por ejemplo a las cuartas, los términos afectados por  $\sin R$  y  $\cos R$  se anulan, quedando,

$$\sum_n z = n(Z + k \cdot Z + R) = n \cdot Z \left( 1 + k + \frac{R}{Z} \right)$$

Denominando por “μ” la expresión del paréntesis:

$$\sum_n z = n \cdot \mu \cdot Z,$$

de donde

$$\mu \cdot Z = \frac{\sum_n z}{n}$$

Es decir,  $Z\mu$  representa el promedio de las fuerzas verticales a todos los rumbos, o sea, la fuerza vertical media.

Despejando:

$$\mu = \frac{\sum_n z}{n \cdot Z} \quad [\text{III.35}]$$

Por lo tanto el coeficiente “μ” se puede definir como la relación entre la fuerza vertical media y la componente Z del magnetismo terrestre.

Si un buque está compensado adrizado,  $e = e_2$  y  $\lambda = \lambda_2$ , por lo tanto la expresión del coeficiente J será:

$$J = \frac{-R}{\lambda \cdot H_2} + \frac{e_2 - k}{\lambda_2} \frac{Z}{H} \quad [\text{III.35}]$$

Si se anula el desvío de escora queda anulado el coeficiente J ( $\Delta_e = J \cdot i \cdot \cos R$ ), por lo tanto:

$$J = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{-R}{\lambda \cdot H_2} + \frac{e_2 - k}{\lambda_2} \frac{Z}{H} = 0$$

$$e_2 - k = \frac{R}{Z} \quad [\text{III.36}]$$

Recordando la expresión de  $\mu$ :

$$\mu = 1 + k + \frac{R}{H} \quad [\text{III.37}]$$

si se modifica el imán vertical para anular el desvío de escora  $\mu = \mu_2$ , por lo tanto:

$$\mu_2 = 1 + k + \frac{R}{H} \quad [\text{III.38}]$$

pero

$$\frac{R}{\lambda} = e_2 - k$$

por lo tanto:

$$\mu_2 = 1 + k + e_2 - k = 1 + e_2 = \lambda_2$$

La conclusión deducida es que una vez compensado un buque en sus dos aspectos, adrizado y escorado,

$$\mu_2 = \lambda_2 \quad [\text{III.39}]$$

## 2.2.- COMPENSACIÓN TEÓRICA DEL DESVÍO DE ESCORA.

El desvío de escora se puede anular a través del conocimiento previo del coeficiente J en sus dos aspectos: la parte del coeficiente debido a imán permanente y la parte correspondiente de imán accidental:



$$J = J_p + J_{ac} \quad [III.40]$$

con  $J_p = \frac{-R}{\lambda \cdot H}$

y  $J_{ac} = \frac{e - k}{\lambda} \frac{Z}{H}$

Para desglosar los dos valores que componen el coeficiente  $J$  es necesario obtener su valor en dos lugares de latitudes diferentes que impliquen una variación significativa del valor de la componente vertical del magnetismo terrestre  $Z$ .

En un lugar de  $Z$  y  $H$  conocidos, se aproa a rumbos Norte o Sur y, supuestamente compensado el buque en condición adrizada, se escora un ángulo de unos  $10^\circ$  trasladando sustancias no magnéticas, obteniéndose el desvío de escora:

$$\Delta_e = \Delta_i - \Delta_a; \quad \text{Si } \Delta_a = 0 \quad \Rightarrow \quad \Delta_e = \Delta_i$$

De [III.29] se calcula el valor de  $J$ ,

$$J = \frac{\Delta_e}{i \cdot \cos R}$$

El signo del coeficiente  $J$  dependerá de “ $\cos R$ ”, de considerar la escora “ $i$ ” con valor positivo a estribor y negativo a babor y, por supuesto, del desvío de la aguja hacia el NW (–) o hacia el NE (+). Se puede demostrar que en todos los casos el coeficiente  $J$  toma valores positivos cuando la aguja se desvía a la banda de la escora y negativos cuando lo hace a la banda contraria. Los buques construidos en el Hemisferio Norte magnético tienen polaridad roja en la quilla y azul en cubierta, lo que supone un desvío hacia la banda contraria, es decir,  $J$  negativo.

Repitiendo el cálculo de  $J$  en otro lugar de  $Z'$  y  $H'$  conocidos se obtiene:

$$J' = \frac{\Delta_e}{i \cdot \cos R}$$

Una vez calculado  $J$  y  $J'$  se puede calcular la parte del magnetismo accidental y permanente según:

$$J = \frac{-R}{\lambda \cdot H} + \frac{e - k}{\lambda} \frac{Z}{H}$$

$$J' = \frac{-R}{\lambda \cdot H'} + \frac{e - k}{\lambda} \frac{Z'}{H'}$$

restando y despejando:

$$e - k = \lambda \frac{J \cdot H - J' \cdot H'}{Z - Z'} \quad [\text{III.41}]$$

Por lo tanto, la parte de J correspondiente al magnetismo accidental será:

$$J_{ac} = \frac{e - k}{\lambda} \frac{Z'}{H'} \quad [\text{III.42}]$$

y la parte correspondiente al magnetismo permanente:

$$J_p = J' - J_{ac} \quad [\text{III.43}]$$

Conocido  $J_p$  y  $J_{ac}$  se puede calcular el desvío de escora para cualquier rumbo y lugar y proceder a su correcta anulación.

Nota.— En caso de estar la aguja correctamente compensada de desvío cuadrantal a través de las esferas, en las fórmulas anteriores deberán hacerse las sustituciones de “e” por “ $e_2$ ” y “ $\lambda$ ” por “ $\lambda_2$ ”.

### 2.2.1.- COMPENSACIÓN TRADICIONAL DEL DESVÍO DE ESCORA.

Para efectuar la corrección del desvío de escora,  $\Delta_e$ , se trasladan sustancias no magnéticas, tal como el lastrado de tanques laterales, hasta conseguir una escora de 10 grados aproximadamente. A continuación se pone proa al N ó al S, teniendo en cuenta que a tales rumbos se manifiesta con más intensidad el  $\Delta_e$  por ser función de  $\cos R$ .

Al tratarse de una fuerza que actúa en el eje Z, el corrector empleado actualmente es uno o varios imanes verticales, o sea, un imán  $R_1$  corrector que anula, no solamente la parte de imán permanente vertical del buque (R), sino también la parte del magnetismo accidental ( $e - k$ ).

Al escorarse el buque, la aguja náutica permanecerá horizontal debido a la suspensión Cardan con lo que el polo activo del imán R del buque se sale de la vertical, provocando una fuerza de atracción o repulsión sobre el rojo de la aguja (elemento indicatriz del rumbo). Esta fuerza se descompone en una componente vertical, que no

actúa debido a la situación del centro de suspensión del chapitel/estilo sobre el centro de gravedad, y otra horizontal, causante del desvío.

La misión del imán corrector  $R_1$  será la de provocar una fuerza igual y de sentido contrario, para lo cual se coloca el imán con el polo activo de signo contrario al del buque en la parte superior.

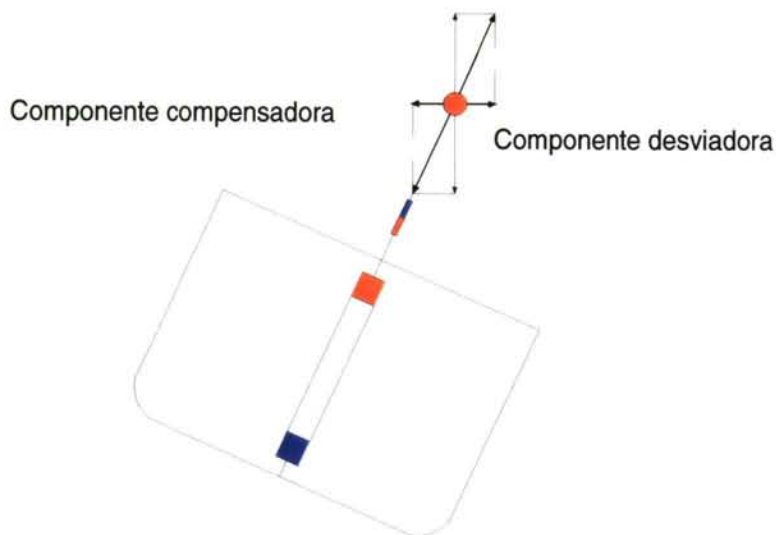


FIGURA III.10.- EFECTO DEL IMÁN VERTICAL

Las dimensiones del imán corrector de escora son de 9 pulgadas de longitud y 3/8 de pulgada de diámetro y van alojados en un estuche de latón o madera con capacidad, en las bitácoras grandes, de 7.

A medida que el imán se acerca a la aguja su efecto será mayor, pero si llegado al tope superior (aproximadamente a 16 pulgadas del centro de agujas) no hubiese corregido el desvío en su totalidad, se colocarán dos imanes y se comenzaría desde la posición inferior; a este propósito el estuche va anclado con una cadena de latón discurriendo todo el conjunto por el centro de la bitácora, En el caso de que dos imanes no fuesen suficientes, se emplearían tres, cuatro, ... etc. hasta un total (improbable) de siete.

En todos los casos la colocación debe de ser simétrica para que la resultante de todos los imanes se ejerza en el eje vertical del centro de las agujas (ver figura II.34).

### 2.2.2.- COMPENSACIÓN APROXIMADA DEL DESVÍO DE ESCORA A BORDO.

Cuando un buque navega a rumbos próximos al meridiano magnético y no está compensado el desvío de escora o si lo está sólo parcialmente, bien por cambio de latitud geográfica u otros factores, la aguja se desvía alternativamente a una u otra banda con los balances, sin que la suspensión Cardan evite este fenómeno. La causa deriva de las componentes horizontales del magnetismo vertical que cambian alternativamente de sentido con el balance del barco.

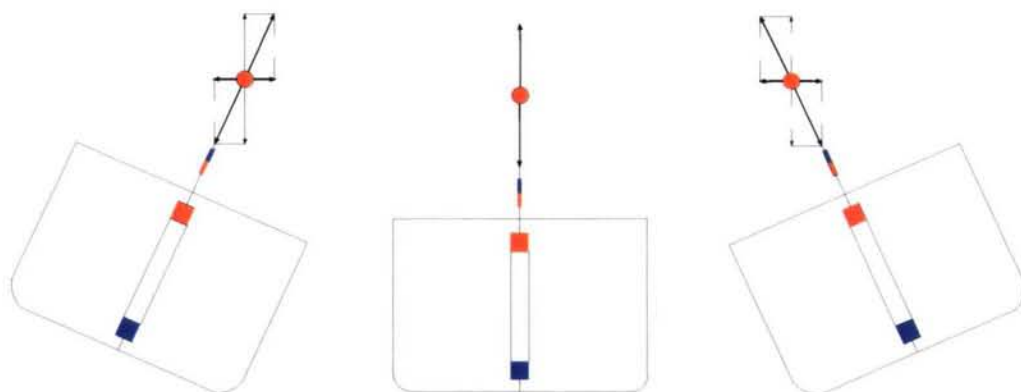


FIGURA III.11.- DESVÍOS ALTERNATIVOS

Para compensar provisionalmente el barco se sitúa el corrector de escora en el fondo de la bitácora con el imán en sentido apropiado, es decir, con el polo rojo hacia arriba si el desvío es a la banda contraria de la escora o viceversa, y se va subiendo lentamente mediante la cadena hasta el punto donde se amortiguan las oscilaciones al máximo. En caso de llegar al tope superior y no haber conseguido el pleno efecto, se comienza desde la parte inferior con dos imanes, tres, etc. [MOLI-59:126]





## **CAPÍTULO IV.- CORRECCIÓN DEFINITIVA DEL DESVÍO DE ESCORA. CONTRASTE PRÁCTICO EN LABORATORIO**



**1.- CORRECCIÓN DEFINITIVA DEL DESVÍO DE ESCORA  
MEDIANTE LA INTRODUCCIÓN DE UNA TERCERA  
ESFERA**



## 1.1.-PLANTEAMIENTO

Según lo expuesto, para corregir el desvío de escora y que la corrección sea válida en todos los lugares, es necesario conocer las dos partes intervinientes en el coeficiente J, es decir, J accidental y el J permanente. Esto implica el cálculo del desvío de escora en dos lugares de valores de Z sensiblemente diferentes.

El conocimiento apriorístico de las dos partes del coeficiente J sirve para saber en cualquier lugar geográfico el valor del desvío de escora y poder determinar la posición correcta del imán vertical a fin de anular dicho desvío.

Tradicionalmente se ha venido corrigiendo el desvío de escora mediante la introducción de un imán permanente  $R_1$ , que anula en un lugar determinado el coeficiente J y, consecuentemente, el desvío de escora.

Al variar de lugar, y con ello el valor de Z y H, varían proporcionalmente los valores de J permanente y del efecto  $R_1$ , (por estar influenciados solamente por la componente H) pero no así el valor de J accidental, influenciado por Z y H por lo que es necesario volver a reposicionar de nuevo el corrector  $R_1$ .

Cabe preguntarse entonces la utilidad de conocer las dos componentes del coeficiente J; simplemente tiene por objeto conocer el desvío de escora que tendrá el buque en cualquier lugar al que se vaya a desplazar, o sea, un conocimiento a priori de la ubicación del corrector vertical. Esto limita en la práctica la utilidad del método de corrección, ya que hasta el momento en que el buque llega al lugar del cálculo, el desvío va cambiando progresivamente, y si se desea llevarlo anulado en todo momento, se debe ir moviendo el imán vertical  $R_1$  a medida que se vaya manifestando el cambio en el desvío de escora.

Planteado el problema en el estado actual, la solución pasa por corregir separadamente el magnetismo permanente,  $J_p$ , con el imán vertical y el magnetismo accidental  $J_{acc}$ , mediante un corrector adicional de hierro dulce.

La primera parte de esta solución no plantea ningún problema; teniendo en cuenta que  $J_p = \frac{-R}{\lambda_2 H}$  su anulación se consigue mediante la introducción del imán vertical  $R_1$  que ejerza una acción contraria.



La segunda parte de la solución, correspondiente al  $J_{acc}$ , plantea un análisis previo de las componentes. Suponiendo que el buque está compensado adrizado,

$$J_{acc} = \frac{e_2 - k}{\lambda_2} \frac{Z}{H} \quad [IV.1]$$

con  $\lambda_2 = 1 + e_2$  [KLIN-74:124]

Las varillas  $a_2$  y  $e_2$  son las resultantes de modificar el valor de las varillas  $a$  y  $e$  del buque mediante la introducción de las esferas, cuyas componentes correctoras son  $a_1$ ,  $e_1$ , y  $k_1$ , esta última sin función con el buque adrizado.

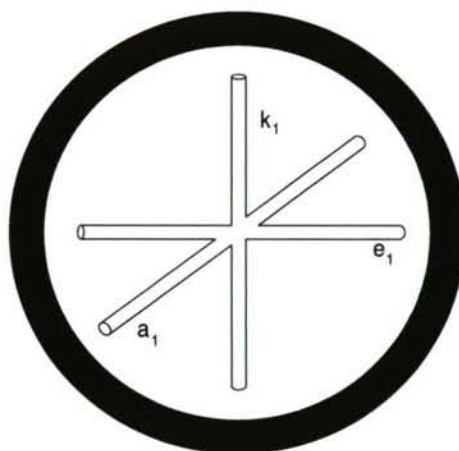


FIGURA IV.1.- VARILLAS CORRECTORAS DE LAS ESFERAS [KLIN-74:110]

Al escorar el buque, la varilla  $k$ , que no ejerce desvío cuando está adrizado, introduce un desvío adicional conjuntamente con el componente  $k_1$  de las esferas. Llamando  $k_2$  a la acción de  $k+k_1$ , la ecuación anterior [IV.1] se puede poner bajo la forma,

$$J_{acc} = \frac{e_2 - k_2}{\lambda_2} \frac{Z}{H} \quad [IV.2]$$

Para anular  $J_{acc}$ , es suficiente igualar los valores de  $e_2$  y  $k_2$ , introduciendo los elementos correctores oportunos.

De los valores del coeficiente  $D$  y de  $\lambda$  se calcula el valor de  $a$  y  $e$  (varillas del buque):

$$\left. \begin{array}{l} \text{sen } D = \frac{a - e}{2\lambda} \\ \lambda = 1 + \frac{a + e}{2} \end{array} \right\} \begin{array}{l} a = \lambda(1 + \text{sen } D) - 1 \\ e = \lambda(1 - \text{sen } D) - 1 \end{array} \quad [\text{IV.3}]$$

Los correctores,  $a_1$  y  $e_1$ , de las esferas tienen por valor:

$$\begin{aligned} a_1 &= -\frac{1}{3}(a - e) \\ e_1 &= \frac{2}{3}(a - e) \end{aligned} \quad [\text{IV.4}]$$

Por lo tanto, el valor combinado será:

$$a_2 = a + a_1 \quad [\text{IV.5}]$$

$$e_2 = e + e_1 \quad [\text{IV.6}]$$

siendo  $a_2 = e_2$

y el valor de  $\lambda_2 = 1 + e_2$

Al introducir las esferas para igualar los valores de  $a_2$  y  $e_2$ , se introducen las varillas correctoras  $a_1$ ,  $e_1$  y  $k_1$  todas iguales, pero de distinto signo respecto a su acción sobre la aguja. Las varillas  $e_1$  son positivas pero las varillas  $a_1$  y  $k_1$  son negativas.

La posición de las esferas determina el valor necesario de las varillas correctoras  $a_1$  y  $e_1$  para la corrección del coeficiente  $D$ , pero no se tiene en cuenta la influencia de la varilla correctora  $k_1$  ya que con el buque adrizado ejerce influencia sobre la aguja.

Por lo tanto, la resultante  $k_2 = k_{\text{buque}}(k) + k_{\text{esferas}}(k_1)$  no tiene por qué ser igual a  $a_2$  o  $e_2$  lo que obliga al cálculo de  $k_2$ .

Recordando que:

$$\frac{e - k}{\lambda} = \frac{J \cdot H - J' \cdot H'}{Z - Z'}$$

expresión, que al haber compensado previamente adrizado, se transforma en:

$$\frac{e_2 - k}{\lambda_2} = \frac{J \cdot H - J' \cdot H'}{Z - Z'}$$

$$k = e_2 - \lambda_2 \frac{J \cdot H - J' \cdot H'}{Z - Z'} \quad [IV.7]$$

Con los valores calculados de  $k(\text{barco})$  y  $k_1$  (esferas) se obtiene el valor de  $k_2$ :

$$k_2 = k + k_1 \quad [IV.8]$$

Los buques mercantes tienen casi siempre una componente de  $k$  positiva (varilla corta o partida); la acción combinada de  $k$  y  $k_1$  (de esferas) no es suficiente para dar una resultante negativa por lo que es necesario añadirle una nueva varilla  $k_3$  correctora, consistente en una tercera esfera a proa o a popa del compás. Esta tercera esfera aporta una varilla  $-k_3$ , una varilla  $-e_3$  y una varilla  $+2a_3$

Al acercar o alejar del centro de la rosa la tercera esfera no aumenta o disminuye el valor de  $k_3$  pero también lo hacen  $a_3$  y  $e_3$ . La influencia de estas últimas se suman a las de las esferas de través por lo que se modifica a su vez la corrección del coeficiente D.

Por lo tanto, la corrección del coeficiente D y la anulación de J accidental ha de hacerse conjuntamente, para lo cual se precisa un replanteamiento de la distancia de las esferas de través.

Llamado “x” al efecto de las esferas de través e “y” a la esfera de proa, el efecto de las varillas correctoras será:

$$\text{Esferas de través:} \quad a_1 = -x \quad e_1 = +2x \quad k_1 = -x \quad [IV.9]$$

$$\text{Esfera a proa:} \quad a_3 = +2y \quad e_3 = -y \quad k_3 = -y \quad [IV.10]$$

La justificación del signo positivo o negativo deriva de la posición de cada varilla correctora respecto al centro de agujas (babor-estribor) y la acción unitaria o doble también se deriva de la posición de la varilla tal como quedó expuesto en el Capítulo II, número ordinal:1.2.7 “*ACCIÓN DE LOS POLOS DE UN IMÁN CORRECTOR SOBRE LOS POLOS DE LA AGUJA NÁUTICA*”, donde se resaltó la importancia de las conclusiones respecto al tronco de la presente Tesis Doctoral.

Para anular el coeficiente D y la parte de J accidental:

$$a_T = e_T = k_T \quad [IV.11]$$

con:

$$a_T = a + a_1 + a_3 \quad [\text{IV.12}]$$

$$e_T = e + e_1 + e_3 \quad [\text{IV.13}]$$

$$k_T = k + k_1 + k_3 \quad [\text{IV.14}]$$

Resolviendo las ecuaciones, resulta:

$$x = \frac{k - e}{3} \quad [\text{IV.15}]$$

$$y = \frac{k - a}{3} \quad [\text{IV.16}]$$

El ajuste de la distancia de las esferas de través será:

$$a_1 \cdot d^3 = x \cdot d'^3 \quad [\text{IV.17}]$$

con:

$a_1$  = valor de la varilla correctora en la compensación del coeficiente D con el buque adrizado.

$d_3$  = distancia correspondiente para anular D con el buque adrizado (distancia de centro de la rosa a centro interno de la esfera)

$x$  = valor calculado

$d'$  = distancia final

La distancia de la tercera esfera viene expresada por:

$$\frac{k_1}{2} d^3 = y \cdot d''^3 \quad [\text{IV.18}]$$

con:

$k_1 = a_1$ , valor de la varilla correctora antes de colocar la tercera esfera. El coeficiente  $\frac{1}{2}$  se justifica por el hecho de tratarse de una sola esfera.

$d$  = distancia a que estaban colocadas las esferas de través.

$y$  = valor calculado

$d''$  = distancia resultante. [GRAN-76:376]





## **2.-COMPROBACIÓN EN LABORATORIO**



## 2.1.- ESTABLECIMIENTO

Para anular las dos partes intervinientes en el desvío de escora, es decir, la parte de coeficiente J accidental y la parte del coeficiente J permanente con correctores de su clase, es necesario calcular el desvío de escora en dos lugares de componente vertical de magnetismo terrestre, Z, claramente diferenciados.

El cálculo queda simplificado si uno de los lugares es el ecuador magnético,  $Z = 0$ .

Para obviar la dificultad que entrañaría una toma de datos en las condiciones arriba expresadas se hace uso del desvioscopio, ubicado en un laboratorio del ala oeste de la Escuela Superior de Marina Civil de Gijón. Se ha procurado evitar todos los elementos próximos capaces de alterar el campo magnético terrestre alrededor del desvioscopio.

Se toman como valores de la fecha de las experiencias los valores de  $Z = 0,380$  y  $H = 0,235$ , según datos facilitados por el Instituto Geográfico Nacional.

Se procede a estacionar el aparato en un lugar fijo, marcando cuidadosamente la base en el suelo a fin de evitar desplazamientos del mismo.

A continuación se marcan los puntos cardinales y cuadrantales magnéticos mediante líneas verticales en paredes y ventanas, tomando como origen de las visuales la posición de la aguja náutica del desvioscopio. Las lecturas se hacen mediante un fluxgate y para estacionarlo en el lugar que ocupaba la aguja del desvioscopio, se retira éste hasta una distancia apropiada donde no ejerza influencia magnética sobre el fluxgate.

Operando con el desvioscopio, se pueden establecer dos bases diferenciadas pero de objetivos idénticos. La primera opción consiste en colocar el imán R del buque y anularlo con el imán corrector vertical Ri sin haber colocado elementos de hierro dulce. Posteriormente se simula el campo magnético accidental, y de esta manera todo el desvío posterior generado sobre la aguja sería debido a los hierros dulces, en concreto a las varillas "a", "e" y "k". A partir de este supuesto se procedería a anular el desvío cuadrantal adrizado y posteriormente, mediante escora, anular el desvío correspondiente al coeficiente J accidental mediante la tercera esfera y ajuste de las esferas de través.

La segunda opción consiste en obviar el magnetismo permanente, es decir, no instalar magnetismo permanente en el desvioscopio y colocar solamente varilla a, e, y k y proceder a su anulación según lo expuesto. Esta segunda opción es la empleada en el presente trabajo.

## 2.2.- ELEMENTOS DEL LABORATORIO

Para proceder apropiadamente con las medidas se hace uso de los siguientes elementos:

1 desvioscopio “Cooke-Beall”, al que previamente se le instaló una guía de metal a proa de la aguja náutica. Las ranuras de las tres guías de las tres esferas fueron alargadas mediante limado para obtener mas recorrido y poder, de esta manera, trabajar con valores más sensibles.

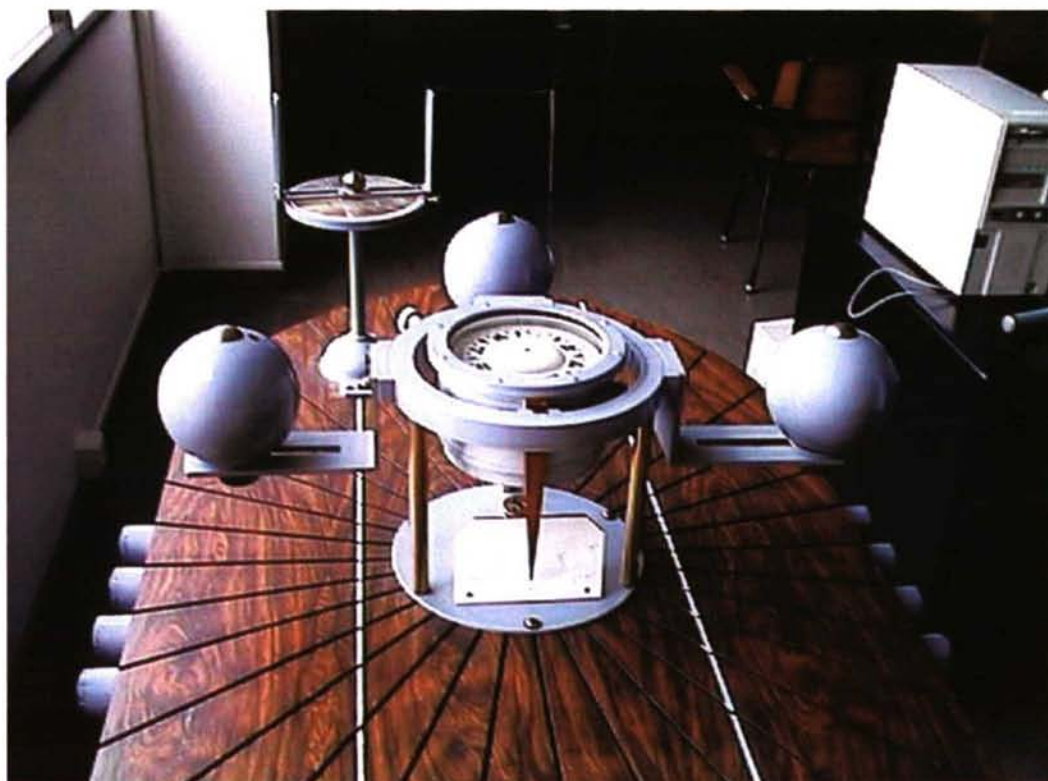


FIGURA IV.2 DESVIOSCOPIO CON 3 ESFERAS

1 Fluxgate para orientar sobre las paredes del laboratorio las visuales a los puntos cardinales y cuadrantales magnéticos desde un origen preciso.

1 aguja magnética oscilante adaptada.



1 cronógrafo.

1 trípode de madera y metal adaptado para estacionarlo sobre la vertical del centro de la rosa.

### 2.2.1. - EL DESVIOSCOPIO “COOKE BEALL”

Es un modelo de trabajo empleado para ilustrar las principales fuerzas magnéticas capaces de provocar desvíos en la aguja náutica y el modo de corregir estos desvíos.

El Desvioscopio se compone de una tarima o bastidor, que tiene un círculo de marcar impreso en su parte superior. El círculo de marcar se puede usar como alidada para indicar el rumbo del buque. Sobre él está montada la tarima en un brazo de latón fundido, rodeado por un casquillo en el que trabaja un pasador central fijo en el bastidor. Tiene un puntero en la línea de proa/popa capaz de girar sobre la parte superior del círculo de marcar. El rumbo que marca la proa se puede observar a través de una pequeña abertura practicada en la cubierta, dirigida al círculo de marcar. El tornillo de la abrazadera, en el costado del casquillo central, ha de estar flojo para permitir que la cubierta gire con plena libertad y sólo se ajustará si, por algún motivo, se precisa hacer firme la proa del barco a algún rumbo particular, o en caso de querer escorarla. El tornillo de la abrazadera, en el semicírculo de latón por debajo de la cubierta en la parte de popa, regula la escora de la cubierta.

Las treinta y dos ranuras radiales grabadas en la cubierta indican las 32 cuartas del compás. Estas ranuras también se usan para facilitar la demostración del magnetismo permanente del barco colocando los imanes que produzcan un campo de distorsión en los extremos de dichas ranuras. Las cuatro ranuras que coinciden exactamente con la proa, popa y el través del buque, se emplean para corregir el magnetismo permanente, usando imanes a proa, popa y los costados de babor y estribor para los coeficientes B y C respectivamente.

Las cuatro aberturas practicadas bajo la cubierta se utilizan para la inserción de piezas huecas de hierro dulce que representan los baos del barco, con el fin de producir el desvío cuadrantal.



El estuche de latón fijo bajo la cubierta está situado inmediatamente bajo el centro de la rosa y contiene un imán vertical que se usa para demostrar el error de escora. Sobre la cubierta, justo encima del espacio para la colocación de los imanes que han de producir el error de escora, se encuentra el estuche para la compensación de este error. Este tiene 5 agujeros en los que se pueden alojar otros tantos imanes correctores de  $1\frac{1}{2}'' \times 1/8''$ . Su altura se ajusta por medio de un tornillo.

También hay un clinómetro, situado a popa de la bitácora, para indicar el ángulo de escora o si el barco está adrizado.

El compás está montado sobre la bitácora en el centro de la cubierta y es una aguja de líquido que favorece la eficacia de la manipulación.

A cada lado de la aguja, sobre la bitácora y en el centro de la cubierta, están las guías y tornillos que soportan las esferas de hierro dulce. Las esferas se pueden girar  $360^\circ$  aflojando el tornillo situado en la aleta de estribor de la bitácora, pudiendo de esta manera anularse los coeficientes D y E.



FIGURA IV.3.- DESVIOSCOPIO

El círculo de marcar está montado sobre la cubierta, a popa y a babor. Éste no es más que una chapa de latón graduada de 0° a 360° con capacidad de giro y una alidada para tomar demoras.

Con cada modelo se suministra el siguiente equipo de imanes correctores:

$$2 \quad 8'' * \frac{1''}{2} * \frac{1''}{16}$$

$$3 \quad 5'' * \frac{1''}{2} * \frac{1''}{16}$$

$$2 \quad 4'' * \frac{1''}{2} * \frac{1''}{16}$$

$$2 \quad 3'' * \frac{1''}{2} * \frac{1''}{16}$$

$$1 \quad 2'' * \frac{3''}{8}$$

$$5 \quad 1'' * \frac{1''}{2} * \frac{1''}{8}$$

Los elementos de hierro dulce son:

- 1 Barra Flinders para la corrección de B.
- 4 Barras de hierro dulce para la introducción de D.
- 2 Esferas para la corrección de D y E.

La rutina de ajuste del desvioscopio consiste en dos pasos, el primero consta en colocar el elemento de chimenea en el estuche de latón situado a popa, en la cubierta, sobre la línea de crujía. El barco debe estar a rumbo Este u Oeste para realizar esta operación. Con esto se ocasionará un desvío de hasta 5°. Colocar las cuatro barras de hierro dulce en las aperturas que hay debajo de la cubierta. Las dos esferas de 3½'' de diámetro deberán estar a mitad del recorrido de los brazos que las soportan. A continuación se colocarán los dos imanes de 2'' x 3/8'' que producen el desvío de escora en el estuche correspondiente. En este momento se pueden colocar dos imanes permanentes de 8'' en las ranuras de la cubierta, haciendo especial hincapié en situarlos en lugares opuestos. Uno de los imanes tendrá su polo rojo apuntando hacia el exterior

del buque y el otro tendrá el polo azul en esta misma posición, para de esta forma simular el magnetismo permanente del barco inducido por las líneas de fuerza de la tierra, durante la construcción del barco en la grada del astillero.

Sobre el modelo, ahora, actúan todas las fuerzas perturbadoras que producen el desvío de un compás en un barco.

El segundo paso consiste en cómo establecer la demora magnética de un objeto distante.

Asumiendo que el objeto distante está a la vista del modelo girar éste hasta que la aguja señale el rumbo Norte. Ahora situar el círculo de marcar también a rumbo Norte. Tomar entonces la demora del objeto con el círculo de marcar como referencia. Girar de nuevo el modelo hasta que la aguja señale el rumbo Nordeste, y hacer lo mismo con el círculo de marcar, es decir, ponerlo al 045°. En esta posición tomar de nuevo la demora del objeto y anotarla.

Esta operación se repetirá para los 4 rumbos cardinales y los 4 cuadrantales, de forma que al final se tendrán anotadas 8 demoras que se sumarán. La cifra resultante dividirla por 8. Esta nueva demora magnética también se anota.

#### 2.2.1.1.-CORRECCIÓN DEL DESVÍO DEL MODELO.

##### *CORRECCIÓN DEL COEFICIENTE B (BETA)*

Poner el modelo a rumbo Este u Oeste de aguja y seguidamente insertar la barra Flinders a proa de la bitácora, en el orificio central. Esto eliminará entre 3° y 5° el desvío producido por la chimenea.

##### *CORRECCIÓN DEL DESVÍO DE ESCORA*

Girar el modelo al rumbo Norte o Sur de aguja y apretar el pasador que hace firme el rumbo del barco. A continuación escorar la base unos 20° aproximadamente. La aguja se desviará unos 5° o 6°. Con esta prueba se demuestra la existencia del error de escora. Para corregirlo se usarán los imanes 1½" x 1/8", que se colocarán en el estuche situado justamente detrás del compás. Se irán levantando hasta que se haya corregido el error y la lectura en la aguja sea al Norte o Sur, tal como se había establecido al principio. (Si los imanes se colocaran con los polos invertidos, el error en lugar de disminuir se iría incrementando).



### *CORRECCIÓN DEL DESVÍO DE ESCORA USANDO “VERTICAL FORCE INSTRUMENT”*

El modelo se pondrá a rumbo de aguja Este u Oeste (Nótese la diferencia de procedimiento respecto al método anterior). Esto se hace para eliminar el efecto de la varilla “g”. Ahora coloque el instrumento que produce el error de escora en la bitácora quitando la aguja de sus ranuras una vez que el rumbo sea correcto. Colocar el peso móvil en el extremo sur de la aguja para una cantidad determinada de “ $\lambda$ ”. Por ejemplo, multiplica el número de divisiones por 0,8 o 0,9, haciéndolo fijo. La aguja se inclinará y como en el método anterior, colocar 3 ó 4 imanes correctores de 1½” x 1/8” en el estuche e ir levantándolos hasta que la aguja del clinómetro quede horizontal, con lo que quedará corregido el error de escora.

### *CORRECCIÓN DEL COEFICIENTE B (PERMANENTE)*

Con el modelo todavía a rumbo Este u Oeste usar una demora magnética conocida y poner el modelo a rumbo de aguja Este u Oeste, evitando cualquier desvío que se produzca debido al empleo de imanes longitudinales en las ranuras transversales. (Si el coeficiente B es de signo positivo el imán se colocará con el rojo apuntando hacia proa y si es de signo negativo con el rojo apuntando hacia popa).

### *CORRECCIÓN DEL COEFICIENTE D*

Poner el modelo al rumbo cuadrantal más próximo al inmediatamente anterior. Por ejemplo, si estaba al Este se pondrá al Nordeste y si estaba al Oeste se pondrá al Noroeste. Todos los rumbos, por supuesto, de aguja. En esta posición alterar las esferas de hierro dulce para corregir el coeficiente D.

### *CORRECCIÓN DEL COEFICIENTE C*

Colocar el modelo al rumbo Norte o Sur magnéticos más cercanos y colocar un imán transversal en las ranuras que dibujan la línea proa-popa (si el coeficiente C es de signo positivo, el imán se pondrá con el rojo a estribor, si por el contrario el coeficiente C es de signo negativo, el imán se pondrá con el rojo a babor).

### *PRUEBA FINAL*

Girar el modelo a los ocho rumbos principales y anotar los desvíos. Pueden aparecer desvíos residuales que pueden ser corregidos como se ha visto, calculando de nuevo los coeficientes correspondientes y corrigiéndolos.

### *AJUSTE DEL DEFLECTOR DEL DESVIOSCOPIO*

Este método se basa en el principio de que si la fuerza directriz que actúa sobre la aguja es igual para todos los rumbos entonces puede no haber desvío.

La deflexión ideal para propósitos de ajuste debe estar comprendida entre los 70° y 80°. Esta cantidad siempre se puede alterar, aumentándola o disminuyéndola, manipulando el ángulo de apertura que forman los dos imanes deflectores.

### *AJUSTE DEL DESVIOSCOPIO USANDO EL DEFLECTOR*

Colocar los imanes perturbadores del campo magnético en posición. Por ejemplo en la posición de los imanes de rumbo de grada, de los imanes que causan el error de escora, etc. A continuación colocar la barra Flinders y las esferas de hierro dulce a mitad de recorrido. Corregir el error de escora empleando cualquiera de los dos métodos descritos anteriormente.

Virar el modelo al rumbo de aguja Norte y colocar con cuidado el deflector en lo alto del compás con el puntero sobre el Norte, girar el deflector siguiendo el Norte del compás y a la vez girar el imán hasta que se obtenga una deflexión, anotar la misma. Quitar ahora el deflector y virar el modelo al Sur de aguja, repetir de nuevo la operación, manteniendo esta vez el puntero sobre el punto Sur de la aguja al mismo tiempo que se gira el imán; anotar la deflexión. (Se debe enfatizar sobre el aspecto que una vez que se haya establecido el ángulo entre los imanes del Deflector éste no se debe alterar).

Manteniendo el modelo a rumbo Sur con deflexión, calcular la deflexión principal. Dividirla entre 2. Ahora colocar un imán longitudinal sobre la cubierta para llevar el valor de la deflexión a la deflexión principal. Con esto se corrige el coeficiente B.

Quitar ahora el deflector y girar el modelo al rumbo de aguja Este. Se obtendrá una deflexión, mantener el puntero sobre el Este del compás, quitar también el imán,



anotar la deflexión. Quitar el deflector y girar el modelo al rumbo de aguja Oeste. Obtener una deflexión. Ahora obtener la deflexión principal del Este + Oeste y colocar un imán transversal sobre la cubierta para llevar la deflexión a su valor principal. Con esto se corrige el coeficiente C.

### *CORRECCIÓN DEL DESVÍO CUADRANTAL*

Si la fuerza directriz es la misma al Norte que al Sur y al Este que al Oeste, entonces no hay desvío cuadrantal. Si la fuerza directriz es mayor al Norte y al Sur que al Este y Oeste, en ese caso la aguja tiene un desvío D positivo y viceversa.

La deflexión principal. Si la deflexión principal es mayor al Norte y al Sur las esferas de hierro dulce se deben alejar, con movimientos muy pequeños, de la aguja. Si la deflexión principal es mayor al Este y Oeste las esferas de hierro dulce se deben acercar a la aguja.

Esta operación se puede repetir para comprobar que ha sido realizada correctamente. [GRAN-76:115/118]

### 2.2.2.- AGUJA MAGNÉTICA OSCILANTE.

La aguja magnética oscilante es una aguja seca colocada en una caja de madera y apoyada sobre el estilo. La caja de madera, redonda, lleva una tapa de cristal sobre la cual se graban una serie de líneas paralelas que tienen como objeto tener una referencia para hacer las lecturas de los periodos de oscilación.

La aguja magnética oscilante se utiliza para calcular el valor de  $\lambda$ .

De [II.28] se tenía que,

$$\lambda = \frac{\sum_n H' \cdot \cos \Delta}{n \cdot H}$$

Desarrollando la ecuación para n rumbos equidistantes, por ejemplo, los rumbos cuadrantales, se tiene:

$$\lambda = \frac{1}{4} \left( \frac{H'}{H} \cos \Delta_{NE} + \frac{H'}{H} \cos \Delta_{SE} + \frac{H'}{H} \cos \Delta_{SW} + \frac{H'}{H} \cos \Delta_{NW} \right) \quad [IV.19]$$

El hecho de escoger precisamente los rumbos cuadrantales se justifica por los desvíos que se introducirán en las experiencias con el desvioscopio.

En un lugar desprovisto de sustancias magnéticas cercanas se calcula el periodo de oscilación  $T$ , con el auxilio de un cronógrafo mediante el desvío de la aguja unos  $30^\circ$  de su posición de equilibrio. El periodo calculado, promedio de unas 10 oscilaciones, tiene por expresión:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{I}{M \cdot H}}$$

A continuación se traslada la aguja magnética oscilante a bordo, se retira el mortero y se coloca en su lugar la aguja; se repite el cálculo del periodo a los cuatro rumbos cuadrantales y con el mismo número de oscilaciones para cada operación; el periodo calculado para cada rumbo tiene por expresión general:

$$T' = 2\pi\sqrt{\frac{I}{M \cdot H'}}$$

Relacionando ambos periodos:

$$\frac{T}{T'} = \frac{2\pi\sqrt{\frac{I}{M \cdot H}}}{2\pi\sqrt{\frac{I}{M \cdot H'}}}; \quad \frac{T^2}{T'^2} = \frac{H'}{H}$$

Sustituyendo en [IV.19] las relaciones  $\frac{H'}{H}$  por los correspondientes periodos a cada rumbo, se obtiene la expresión:

$$\lambda = \frac{1}{4} \left( \frac{T^2}{T_{NE}^2} \cos \Delta NE + \frac{T^2}{T_{SE}^2} \cos \Delta S + \frac{T^2}{T_{SW}^2} \cos \Delta SW + \frac{T^2}{T_{NW}^2} \cos \Delta NW \right) \quad [IV.20]$$

Como aguja magnética oscilante se utiliza una Plath Geomar, modelo de bote salvavidas, desprovisto de líquido por ajustarse sus medidas a las del mortero del desvioscopio.

### 2.2.3.- FLUXGATE.

El Fluxgate, también conocido como compás electrónico, emplea la dirección de las líneas de fuerza del campo magnético para indicar la posición del Norte magnético y, consecuentemente, el rumbo de la embarcación. Dado que las masas magnéticas del buque alteran la dirección de las líneas de fuerza del campo magnético, el fluxgate está afectado, al igual que la aguja náutica, por el desvío provocado por los hierros duros y dulces del buque.

Consiste en un disco que lleva 8 bobinas enrolladas sobre 2 barras de níquel. El sistema va provisto de un elemento pendular, que hace las veces de la suspensión Cardan del mortero, para evitar las perturbaciones por balances y cabezadas. Esto es necesario porque solamente miden la componente horizontal,  $H$ , del magnetismo terrestre, a diferencia de los que se utilizan para otros propósitos y que miden la componente tridimensional del magnetismo terrestre. Los fluxgate instalados fijos en la estructura del buque están encerrados en un recipiente esférico hermético, relleno de aceite con objeto de evitar las vibraciones. Los de tipo portátil no llevan ni elemento suspensor ni relleno de aceite, aunque en estos últimos es necesario hacer las lecturas con el aparato en posición horizontal.

El fluxgate es un magnetómetro de núcleo saturado formado por dos barras de níquel con un bobinado primario y otro secundario, alimentado el primero por una corriente de 12 voltios.

El bobinado primario pasa al secundario creando una inducción electromagnética que actuará según el ángulo que forme la barra con las líneas de fuerza del campo magnético terrestre. Como se trata de dos barras y ambas están colocadas perpendicularmente, la corriente inducida será función del seno del ángulo que forma con las líneas de fuerza en una de ellas y función coseno con la otra barra. Tomando la diferencia de tensiones entre ambas bobinas se obtiene la resultante de ambas, resultante que forma un ángulo con el meridiano magnético.

La resultante así obtenida se traduce a una escala de 0 a 360° presentada en una pantalla digital con precisión de décimas de grado. [COST-93:131/135]

### *ERRORES.*

El fluxgate está sometido a los mismos errores que la aguja náutica, es decir, la influencia de los hierros duros y dulces de a bordo y a las corrientes electromagnéticas inducidas. Es necesario recordar que el Norte señalado por un fluxgate, desprovisto de la influencia de los agentes externos citados, es el Norte magnético, por lo que siempre es necesario tener en cuenta la declinación magnética del lugar, debidamente actualizada, para llevar los rumbos y/o demoras sobre la carta náutica.

### *GRADO DE FIABILIDAD.*

Las lecturas del Fluxgate se realizan al grado, aunque la precisión que nos puede ofrecer los aparatos más sofisticados es la décima de grado.



### **3. PLANTEAMIENTO DE LAS EXPERIENCIAS.**





### 3.1 ELEMENTOS EMPLEDOS.

Una vez estacionado el desvioscopio de acuerdo con lo descrito en el punto 2.1 del presente capítulo, se procede a crear los campos de magnetismo accidental utilizando 4 barras de hierro dulce (efecto e) para generar el coeficiente D, y una quinta barra de similares características para ser utilizada como efecto k.



FIGURA IV.3.- TRÍPODE Y VARILLA +k

La barra que producirá el efecto +k se coloca verticalmente sobre el centro de la aguja náutica del desvioscopio mediante un trípode de aluminio cuyas juntas y guía son de metal, a fin de evitar la introducción de campos magnéticos alterantes.

Asimismo, se dispone de la aguja magnética oscilante y cronógrafo.

### 3.2 METODOLOGÍA DE LAS EXPERIENCIAS.

Se provocan cuatro valores del coeficiente D mediante la introducción de 1, 2, 3 o 4 barras grandes de hierro dulce de babor a estribor en las guías correspondientes a fin de crear cuatro efectos de varilla -e, y de la correspondiente barra de hierro dulce en la parte inferior de la vertical del centro de la aguja para crear el efecto +a.

Mediante esta inclusión se pueden calcular cuatro valores del coeficiente D en orden creciente de magnitud.

Para cada una de los cuatro valores de coeficiente D se coloca la barra vertical, efecto +k, a tres distancias determinadas, 20, 14 y 11 cm. del centro de la aguja. Con este escenario el número de experiencias resultantes es de 12. Aunque sería deseable disponer de mas experiencias, las limitaciones de lectura de los desvíos impiden ampliar el abanico de observaciones. Una de las limitaciones más importantes de este trabajo residen en la imposibilidad de determinar los valores de las lecturas con una precisión mayor de medio grado. Como consecuencia de esta limitación, los valores se ajustan a la magnitud de  $0,5^\circ$ , circunstancia que limita el valor de las cifras decimales de segundo y tercer orden deducidas en los cálculos.

Se determinan los desvíos para el cálculo del coeficiente D la aguja náutica, retirándola a continuación, y se coloca en su lugar la aguja magnética oscilante para la determinación del valor del coeficiente.

Se corrige el coeficiente D colocando las esferas de forma experimental hasta anular los desvíos y a continuación se procede a determinar el coeficiente J con escoras de  $5^\circ$ ,  $7,5^\circ$  y  $10^\circ$  alternando la banda a Br y Er y a rumbos N o S a fin de diversificar los valores y evitar, mediante el promedio, el empleo de valores viciados por defectos de índole oculta.

Por último, se coloca la tercera esfera y se reubican las esferas de Br-Er de acuerdo con los valores deducidos y se procede a determinar los desvíos remanentes.

#### **4.- EXPERIENCIAS**





**EXPERIENCIA Nº 1.1**

a) Elementos introducidos en el desvioscopio.

1 barra de hierro dulce, efecto  $\bar{e}$

1 barra de hierro dulce pequeña, efecto  $\bar{a}$

1 barra de hierro dulce, efecto  $k+$ ; distancia al centro de la rosa = 20 cm.

b) Lectura de desvíos:

$$\Delta NE = 2,5+$$

$$\Delta SE = 2,0-$$

$$\Delta SW = 2,5+$$

$$\Delta NW = 2,5-$$

$$D = \frac{(\Delta NE + \Delta SW) - (\Delta SE + \Delta NW)}{4} \quad D = 2^{\circ},4 +$$

c) Lectura de períodos y cálculo del coeficiente  $\lambda$ .

Periodo en tierra: 28 seg. (10 oscilaciones)

T al NE: 29 seg.

T al SE: 30 seg.

T al SW: 31 seg.

T al NW: 30 seg.

$$\lambda = \frac{1}{4} \left( \frac{T^2}{T_{NE}'^2} \cos \Delta NE + \frac{T^2}{T_{SE}'^2} \cos \Delta SE + \frac{T^2}{T_{SW}'^2} \cos \Delta SW + \frac{T^2}{T_{NW}'^2} \cos \Delta NW \right)$$

$$\lambda = 0,872$$

d) Cálculo de las varillas intervinientes y de  $\lambda_2$

$$\lambda = 1 + \frac{a+e}{2} \quad 0,872 = 1 + \frac{a+e}{2} \quad a+e = 0,256 -$$

$$\begin{aligned} \text{sen } D &= \frac{a+e}{2\lambda} & \text{sen } 2^{\circ},4 &= \frac{a+e}{2 \cdot 0,872} & a-e &= 0,073 \\ a & & & & a &= 0,092- \end{aligned}$$

$$e = 0,165-$$

$$a_1 = -\frac{1}{3}(a - e) \quad a_1 = 0,024-$$

$$e_1 = \frac{2}{3}(a - e) \quad e_1 = 0,049+$$

$$a_2 = a + a_1 \quad a_2 = 0,116-$$

$$e_2 = e + e_1 \quad e_2 = 0,116-$$

$$a_2 = e_2 = 0,116-$$

$$\lambda_2 = 1 + e_2 \quad \lambda_2 = 0,884$$

e) Anulación del coeficiente D (experimental):

Distancia de las esferas ( centro de la rosa a canto interno de la esfera) para anular el coeficiente D: 16,5 cm.

f) Cálculo del coeficiente J

Condición de rumbo: N

Condición de escora: 5° Er.

Lectura del desvío: 1°-

$$\Delta e = J \cdot i \cdot \cos R$$

$$-1^\circ = J \cdot 5 \cdot \cos 0 \quad J = 0,200 -$$

Condición de rumbo: N

Condición de escora: 7,5° Er.

Lectura del desvío: 1,5°-

$$-1,5 = J \cdot 7,5 \cdot \cos 0 \quad J = 0,200 -$$

Condición de rumbo: N

Condición de escora: 10 Er.

Lectura del desvío: 2°-

$$-2^\circ = J \cdot 10 \cdot \cos 0 \quad J = 0,200 -$$

Condición de rumbo: S

Condición de escora: 5 Br.

Lectura del desvío: 1°-

$$-1^\circ = J \cdot (-5) \cdot \cos 180 \quad J = 0,200 -$$

Condición de rumbo: S

Condición de escora: 7°,5° Br.

Lectura del desvío: 2°-

$$-2 = J \cdot (-7,5) \cdot \cos 180 \quad J = 0,267 -$$

Condición de rumbo: S

Condición de escora: 10° Br.

Lectura del desvío: 2°-

$$-2^\circ = J \cdot (-10) \cdot \cos 180 \quad J = 0,200 -$$

Valor de J tomado para la presente experiencia: 0,200-

g) Cálculo de las varillas intervinientes

$$J = \frac{e_2 - k}{\lambda_2} \frac{Z}{H}$$

$$-0,200 = \frac{-0,116 - k}{0,884} \cdot \frac{0,38}{0,235} \quad k = 0,008 -$$

k (buque + esferas) = 0,008+

k (esferas) = 0,024-

k (buque) = 0,032+

$$x = \frac{k - e}{3} = \frac{0,032 + 0,165}{3} = 0,066 +$$

$$y = \frac{k - a}{3} = \frac{0,032 + 0,092}{3} = 0,041 +$$

$$\begin{array}{lll}
 a = 0,092- & e = 0,165- & k = 0,032+ \\
 -x = 0,066- & 2x = 0,132+ & -x = 0,066- \\
 2y = 0,082+ & -y = 0,041- & -y = 0,041- \\
 a_T = 0,076- & e_T = 0,074- & 0 \quad k_T = 0,075-
 \end{array}$$

$$a_T = e_T = k_T = 0,075-$$

h) Colocación de esferas Br/Er

$$\begin{aligned}
 a_1 \cdot d^3 &= x \cdot d'^3 \\
 0,024 \cdot 16,5^3 &= 0,066 \cdot d'^3 \quad d' = 11,8cm.
 \end{aligned}$$

Colocación de la 3ª esfera:

$$\begin{aligned}
 \frac{a_1}{2} d^3 &= y \cdot d''^3 \\
 0,012 \cdot 16,5^3 &= 0,041 \cdot d''^3 \quad d'' = 10,9cm.
 \end{aligned}$$

i) Comprobación de la bondad de la compensación.

Condición: buque adrizado.

$$\Delta NE = 0,5+$$

$$\Delta SE = 0$$

$$\Delta SW = 0,5-$$

$$\Delta NW = 0$$

Condición: buque escorado.

		Rumbos							
		N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Escoras	5° Er	0	0	0	0	0	0	0	0
	7°5 Er	0	0	0	0	0	0	0	0
	10° Er	0	0	0	0	0	0	0	0
	12°5 Er	0	0,5 +	0	0	0	0,5 +	0	0 -
	15° Er	0,5 +	0,5 +	0	0,5 -	0	0,5 +	0	0,5 -
	17°5 Er	0,5 +	1 +	0,5 -	1 -	0,5 +	1 +	0-	1 -
	20° Er	1 +	2,5 +	1 -	2,5 -	0,5 +	2 +	1 -	2,5 -

		Rumbos							
		N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Escoras	5° Br	0	0	0	0	0	0	0	0
	7°5 Br	0	0	0	0	0	0	0	0
	10° Br	0	0	0	0	0	0	0	0
	12°5 Br	0	0,5 -	0	0 -	0	0,5 -	0	0
	15° Br	0,5 -	0,5 -	0	0,5 +	0	0,5 -	0	0,5 +
	17°5 Br	0,5 -	1 -	0,5 +	1 +	0,5 -	1 -	0	1 +
	20° Br	1 -	2,5 -	1 +	2,5 +	0,5 -	2 -	1 +	2,5 +





**EXPERIENCIA N° 1.2**

a) Elementos introducidos en el desvioscopio.

1 barra de hierro dulce, efecto  $\bar{e}$

1 barra de hierro dulce, efecto  $\bar{a}$

1 barra de hierro dulce, efecto  $k^+$ ; distancia al centro de la rosa = 14 cm. cm.

b) Lectura de desvíos:

$$\Delta NE = 2,5+$$

$$\Delta SE = 2,0-$$

$$\Delta SW = 2,5+$$

$$\Delta NW = 2,5-$$

$$D = \frac{(\Delta NE + \Delta SW) - (\Delta SE + \Delta NW)}{4}$$

$$D = 2^\circ,4+$$

c) Lectura de períodos y cálculo del coeficiente  $\lambda$ .

Periodo en tierra: 28 seg. (10 oscilaciones)

T al NE: 29 seg.

T al SE: 30 seg.

T al SW: 31 seg.

T al NW: 30 seg.

$$\lambda = \frac{1}{4} \left( \frac{T^2}{T_{NE}'^2} \cos \Delta NE + \frac{T^2}{T_{SE}'^2} \cos \Delta SE + \frac{T^2}{T_{SW}'^2} \cos \Delta SW + \frac{T^2}{T_{NW}'^2} \cos \Delta NW \right)$$

$$\lambda = 0,872$$

d) Cálculo de las varillas intervinientes y de  $\lambda_2$

$$\lambda = 1 + \frac{a+e}{2}$$

$$0,872 = 1 + \frac{a+e}{2}$$

$$a+e = 0,256-$$

$$\text{sen } D = \frac{a+e}{2\lambda}$$

$$\text{sen } 2^\circ,4 = \frac{a+e}{2 \cdot 0,872}$$

$$a-e = 0,073$$

$$a = 0,092-$$

$$e = 0,165-$$

$$a_1 = -\frac{1}{3}(a - e) \quad a_1 = 0,024-$$

$$e_1 = \frac{2}{3}(a - e) \quad e_1 = 0,049+$$

$$a_2 = a + a_1 \quad a_1 = 0,116-$$

$$e_2 = e + e_1 \quad e_2 = 0,116-$$

$$a_2 = e_2 = 0,116-$$

$$\lambda_2 = 1 + e_2 \quad \lambda_2 = 0,884$$

e) Anulación del coeficiente D (experimental):

Distancia de las esferas ( centro de la rosa a canto interno de la esfera) para anular el coeficiente D: 16,5 cm.

f) Cálculo del coeficiente J

Condición de rumbo: N

Condición de escora: 5° Er.

Lectura del desvío: 2°-

$$\Delta e = J \cdot i \cdot \cos R$$

$$- 2^\circ = J \cdot 5 \cdot \cos 0 \quad J = 0,400 -$$

Condición de rumbo: N

Condición de escora: 7°5 Er.

Lectura del desvío: 2°5°-

$$- 2^\circ 5' = J \cdot 7,5 \cdot \cos 0 \quad J = 0,333 -$$

Condición de rumbo: N

Condición de escora: 10 Er.

Lectura del desvío: 3°5°-

$$- 3^\circ 5' = J \cdot 10 \cdot \cos 0 \quad J = 0,35 -$$

Condición de rumbo: S

Condición de escora: 5 Br.

Lectura del desvío: 1°5-

$$-1^{\circ},5 = J \cdot (-5) \cdot \cos 180 \quad J = 0,300 -$$

Condición de rumbo: S

Condición de escora: 7°5° Br.

Lectura del desvío: 3°0-

$$-3^{\circ},0 = J \cdot (-7,5) \cdot \cos 180 \quad J = 0,400 -$$

Condición de rumbo: S

Condición de escora: 10° Br.

Lectura del desvío: 3°5-

$$-3^{\circ},5 = J \cdot (-10) \cdot \cos 180 \quad J = 0,350 -$$

Valor de J tomado para la presente experiencia: 0,350-

g) Cálculo de las varillas intervinientes:

$$J = \frac{e_2 - k}{\lambda_2} \frac{Z}{H}$$

$$-0,350 = \frac{-0,116 - k}{0,884} \cdot \frac{0,380}{0,235} \quad k = 0,075 +$$

k (barco + esferas) = 0,075 +

k (esferas) = 0,024(-) +

k (buque) = 0,099 +

$$x = \frac{k - e}{3} = \frac{0,075 - (-0,165)}{3} = 0,088 +$$

$$y = \frac{k - a}{3} = \frac{0,075 - (-0,092)}{3} = 0,064 +$$

a = 0,092-

e = 0,165-

k = 0,099 +

$$\begin{array}{lll}
 -x = 0,088- & 2x = 0,176 + & -x = 0,088- \\
 2y = 0,128 + & -y = 0,064- & -y = 0,064- \\
 a_T = 0,052- & e_T = 0,053- & k_T = 0,053- \\
 a_T = e_T = k_T = 0,053- & & 
 \end{array}$$

h) Colocación de esferas Br/Er.

$$\begin{aligned}
 a_1 \cdot d^3 &= x \cdot d'^3 \\
 0,024 \cdot 16,5^3 &= d' = 10.7
 \end{aligned}$$

Colocación de la 3ª esfera:

$$\begin{aligned}
 \frac{a_1}{2} d^3 &= y \cdot d''^3 \\
 0,012 \cdot 16,5^3 &= 0,064 \cdot d''^3 \quad d'' = 9,4cm.
 \end{aligned}$$

i) Comprobación de la bondad de la compensación.

Condición: buque adrizado:

$$\begin{aligned}
 \Delta NE &= 0,5 + \\
 \Delta SE &= 0,5- \\
 \Delta SW &= 0 \\
 \Delta NW &= 0 \qquad D = 0
 \end{aligned}$$



Condición: buque escorado:

		Rumbos							
		N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Escoras	5° Er	0	0	0	0	0	0	0	0
	7°5 Er	0	0	0	0	0	0	0	0
	10° Er	0	0	0	0	0	0	0	0
	12°5 Er	0	0,5 +	0	0	0	0,5 +	0	0
	15° Er	0,5 +	1 +	0	1 -	0	0,5 +	0	0,5 -
	17°5 Er	0,5 +	1 +	0,5 -	1,5 -	0,5 +	1 +	0	1,5 -
	20° Er	1 +	3 +	1 -	3 -	1 +	2,5 +	1 -	3 -

		Rumbos							
		N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Escoras	5° Br	0	0	0	0	0	0	0	0
	7°5 Br	0	0	0	0	0	0	0	0
	10° Br	0	0	0	0	0	0	0	0
	12°5 Br	0	0,5 -	0	0	0	0,5 -	0	0
	15° Br	0,5 -	1 -	0	0,5 +	0	0,5 -	0	0,5 +
	17°5 Br	0,5 -	2 -	0,5 +	1,5 +	0,5 -	1 -	0	1 +
	20° Br	1 -	3 -	1 +	3 +	0,5 -	2 -	1 +	3 +



**EXPERIENCIA N° 1.3**

a) Elementos introducidos en el desvioscopio.

1 barra de hierro dulce, efecto  $\bar{e}$

1 barra de hierro dulce, efecto  $\bar{a}$

1 barra de hierro dulce, efecto  $k+$ ; distancia al centro de la rosa = 11 cm.

b) Lectura de desvíos:

$$\Delta NE = 2,5+$$

$$\Delta SE = 2,0-$$

$$\Delta SW = 2,5+$$

$$\Delta NW = 2,5-$$

$$D = \frac{(\Delta NE + \Delta SW) - (\Delta SE + \Delta NW)}{4} \quad D = 2^{\circ},4 +$$

c) Lectura de períodos y cálculo del coeficiente  $\lambda$ .

Periodo en tierra: 28 seg. (10 oscilaciones)

T al NE: 29 seg.

T al SE: 30 seg.

T al SW: 31 seg.

T al NW: 30 seg.

$$\lambda = \frac{1}{4} \left( \frac{T^2}{T_{NE}^{\prime 2}} \cos \Delta NE + \frac{T^2}{T_{SE}^{\prime 2}} \cos \Delta SE + \frac{T^2}{T_{SW}^{\prime 2}} \cos \Delta SW + \frac{T^2}{T_{NW}^{\prime 2}} \cos \Delta NW \right)$$

$$\lambda = 0,872$$

d) Cálculo de las varillas intervinientes y de  $\lambda_2$

$$\lambda = 1 + \frac{a+e}{2} \quad 0,872 = 1 + \frac{a+e}{2} \quad a+e = 0,256 -$$

$$\begin{aligned} \operatorname{sen} D &= \frac{a+e}{2\lambda} & \operatorname{sen} 2^{\circ},4 &= \frac{a+e}{2 \cdot 0,872} & a-e &= 0,073 \\ a & & & & a &= 0,092- \\ e & & & & e &= 0,165- \end{aligned}$$

$$a_1 = -\frac{1}{3}(a-e) \quad a_1 = 0,024-$$

$$e_1 = \frac{2}{3}(a - e) \quad e_1 = 0,049 +$$

$$a_2 = a + a_1 \quad a_2 = 0,116 -$$

$$e_2 = e + e_1 \quad e_2 = 0,116 -$$

$$a_2 = e_2 = 0,116 -$$

$$\lambda_2 = 1 + e_2 \quad \lambda_2 = 0,884$$

e) Anulación del coeficiente D (experimental):

Distancia de las esferas ( centro de la rosa a canto interno de la esfera) para anular el coeficiente D: 16,5 cm.

f) Cálculo del coeficiente J

Condición de rumbo: N

Condición de escora: 5° Er.

Lectura del desvío: 2°-

$$\Delta e = J \cdot i \cdot \cos R$$

$$-2^\circ = J \cdot 5 \cdot \cos 0 \quad J = 0,400 -$$

Condición de rumbo: N

Condición de escora: 7°5 Er.

Lectura del desvío: 3°5-

$$-3^\circ,5 = J \cdot 7^\circ,5 \cdot \cos 0 \quad J = 0,467 -$$

Condición de rumbo: N

Condición de escora: 10 Er.

Lectura del desvío: 4°5-

$$-4^\circ,5 = J \cdot 10 \cdot \cos 0 \quad J = 0,450 -$$

Condición de rumbo: S

Condición de escora: 5 Br.

Lectura del desvío: 2°,5-

$$-2^{\circ},5 = J \cdot (-5) \cdot \cos 180 \quad J = 0,500 -$$

Condición de rumbo: S

Condición de escora: 7°,5° Br.

Lectura del desvío: 3°,5-

$$-3^{\circ},5 = J \cdot (-7^{\circ},5) \cdot \cos 180 \quad J = 0,467 -$$

Condición de rumbo: S

Condición de escora: 10° Br.

Lectura del desvío: 4°,5-

$$-4^{\circ},5 = J \cdot (-10) \cdot \cos 180 \quad J = 0,450 -$$

Valor de J tomado para la presente experiencia: 0,450-

g) Cálculo de las varillas intervinientes

$$J = \frac{e_2 - k}{\lambda_2} \frac{Z}{H}$$

$$-0,450 = \frac{-0,116 - k}{0,884} \cdot \frac{0,380}{0,235} \quad k = 0,130 +$$

k (buque + esferas) = 0,130+

k (esferas) = 0,024-

k (buque) = 0,154 +

$$x = \frac{k - e}{3} = \frac{0,154 + 0,165}{3} = 0,106 +$$

$$y = \frac{k - a}{3} = \frac{0,154 + 0,092}{3} = 0,082 +$$

a = 0,092-

e = 0,165-

k = 0,154 +

-x = 0,106-

2x = 0,212 +

-x = 0,106-



$$\begin{array}{lll}
 2y = 0,164 + & -y = 0,082- & -y = 0,082- \\
 a_T = 0,034- & e_T = 0,035- & k_T = 0,034- \\
 a_T = e_T = k_T = 0,034-
 \end{array}$$

h) Colocación de esferas Br/Er.

$$\begin{aligned}
 a_1 \cdot d^3 &= x \cdot d'^3 \\
 0,024 \cdot 16,5^3 &= 0,106 \cdot d'^3 \quad d' = 10,0\text{cm.}
 \end{aligned}$$

Colocación de la 3ª esfera:

$$\begin{aligned}
 \frac{a_1}{2} d^3 &= y \cdot d'^3 \\
 d' &= 8,7\text{cm.}
 \end{aligned}$$

i) Comprobación de la bondad de la compensación.

Condición: buque adrizado:

$$\begin{array}{ll}
 \Delta NE = 0 & \\
 \Delta SE = 0,5+ & \\
 \Delta SW = 0 & \\
 \Delta NW = 0,5+ & D = 0
 \end{array}$$

Condición: buque escorado

		Rumbos							
		N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
<b>Escoras</b>	<b>5° Er</b>	0	0	0	0	0	0	0	0
	<b>7°5 Er</b>	0	0	0	0	0	0	0	0
	<b>10° Er</b>	0	0	0	0	0	0	0	0
	<b>12°5 Er</b>	0	1 +	0	0	0	1 +	0	0
	<b>15° Er</b>	0,5 +	1 +	0	0,5 -	0	1 +	0	0,5 -
	<b>17°5 Er</b>	1 +	2,5 +	0,5 -	1,5 -	0,5 +	2 +	0	1 -
	<b>20° Er</b>	1 +	3 +	1 -	3 -	0,5 +	3 +	1 -	3 -

		Rumbos							
		N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
<b>Escoras</b>	<b>5° Br</b>	0	0	0	0	0	0	0	0
	<b>7°5 Br</b>	0	0	0	0	0	0	0	0
	<b>10° Br</b>	0	0	0	0	0	0	0	0
	<b>12°5 Br</b>	0	1 -	0	0	0	1 -	0	0
	<b>15° Br</b>	0,5 -	1 -	0	0,5 +	0	1 -	0	0,5 +
	<b>17°5 Br</b>	1 -	2,5 -	0,5 +	1,5 +	0,5 -	2 -	0 +	1 +
	<b>20° Br</b>	1 -	3 -	1 +	3 +	0,5 -	3 -	1 +	3 +



**EXPERIENCIA N° 2.1**

a) Elementos introducidos en el desvioscopio.

2 barras de hierro dulce, efecto  $\bar{e}$

1 barra de hierro dulce, efecto  $\bar{a}$

1 barra de hierro dulce, efecto  $k+$ ; distancia al centro de la rosa = 20 cm

b) Lectura de desvíos:

$$\Delta NE = 3+$$

$$\Delta SE = 3-$$

$$\Delta SW = 3+$$

$$\Delta NW = 3-$$

$$D = \frac{(\Delta NE + \Delta SW) - (\Delta SE + \Delta NW)}{4} \quad D = 3+$$

c) Lectura de períodos y cálculo del coeficiente  $\lambda$ .

Periodo en tierra: 28 seg. (10 oscilaciones)

T al NE: 30 seg.

T al SE: 31 seg.

T al SW: 29 seg.

T al NW: 30 seg.

$$\lambda = \frac{1}{4} \left( \frac{T^2}{T_{NE}^2} \cos \Delta NE + \frac{T^2}{T_{SE}^2} \cos \Delta SE + \frac{T^2}{T_{SW}^2} \cos \Delta SW + \frac{T^2}{T_{NW}^2} \cos \Delta NW \right)$$

$$\lambda = \frac{1}{4} \left( \frac{28^2}{30^2} \cos 3 + \frac{28^2}{31^2} \cos 3 + \frac{28^2}{29^2} \cos 3 + \frac{28^2}{30^2} \cos 3 \right) = 0,871$$

d) Cálculo de las varillas intervinientes y de  $\lambda_2$

$$\lambda = 1 + \frac{a+e}{2} \quad 0,871 = 1 + \frac{a+e}{2} \quad a+e = 0,091 -$$

$$\text{sen } D = \frac{a-e}{2\lambda} \quad \text{sen } 3 = \frac{a-e}{2 \cdot 0,871} \quad a-e = 0,258 -$$

$$a = 0,084 -$$

$$e = 0,175 -$$

$$a_1 = -\frac{1}{3}(a - e) \quad a_1 = 0,030 -$$

$$e_1 = \frac{2}{3}(a - e) \quad e_1 = 0,061 +$$

$$a_2 = a + a_1 \quad a_2 = 0,114 -$$

$$e_2 = e + e_1 \quad e_2 = 0,114 -$$

$$a_2 = e_2 = 0,114 -$$

$$\lambda_2 = 1 + e_2 \quad \lambda_2 = 0,886$$

e) Anulación del coeficiente D (experimental):

Distancia de las esferas ( centro de la rosa a canto interno de la esfera) para anular el coeficiente D: 15,3cm.

f) Cálculo del coeficiente J

Condición de rumbo: N

Condición de escora: 5° Er.

Lectura del desvío: 1°-

$$\Delta e = J \cdot i \cdot \cos R$$

$$-1^\circ = J \cdot 5 \cdot \cos 0 \quad J = 0,200 -$$

Condición de rumbo: N

Condición de escora: 7°5 Er.

Lectura del desvío: 1°,5-

$$-1^\circ,5 = J \cdot 7^\circ,5 \cdot \cos 0 \quad J = 0,200 -$$

Condición de rumbo: N

Condición de escora: 10 Er.

Lectura del desvío: 2°-

$$-2^\circ = J \cdot 10 \cdot \cos 0 \quad J = 0,200 -$$



Condición de rumbo: S

Condición de escora: 5 Br.

Lectura del desvío: 1°-

$$-1^\circ = J \cdot (-5) \cdot \cos 180 \quad J = 0,200 -$$

Condición de rumbo: S

Condición de escora: 7°,5° Br.

Lectura del desvío: 1°,5-

$$-1^\circ,5 = J \cdot (-7^\circ,5) \cdot \cos 180 \quad J = 0,200 -$$

Condición de rumbo: S

Condición de escora: 10° Br.

Lectura del desvío: 2°-

$$-2^\circ = J \cdot (-10) \cdot \cos 180 \quad J = 0,200 -$$

Valor de J tomado para la presente experiencia: 0,200-

g) Cálculo de las varillas intervinientes

$$J = \frac{e_2 - k}{\lambda_2} \frac{Z}{H}$$

$$-0,200 = \frac{-0,114 - k}{0,886} \cdot \frac{0,38}{0,235} \quad k = 0,004 -$$

k (buque + esferas) = 0,004-

k (esferas) = 0,030-

k (buque) = 0,026+

$$x = \frac{k - e}{3} = \frac{0,026 - (-0,175)}{3} = 0,067 +$$

$$y = \frac{k - a}{3} = \frac{0,026 - (-0,084)}{3} = 0,037 +$$

$$\begin{array}{lll}
 a = 0,084- & e = 0,175- & k = 0,026+ \\
 -x = 0,067- & 2x = 0,134+ & -x = 0,067- \\
 2y = 0,074+ & -y = 0,037- & -y = 0,037- \\
 a_T = 0,077- & e_T = 0,078- & k_T = 0,078- \\
 a_T = e_T = k_T = 0,078-
 \end{array}$$

h) Colocación de esferas Br/Er

$$\begin{aligned}
 a_1 \cdot d^3 &= x \cdot d'^3 \\
 15,3^3 \cdot 0,030 &= d'^3 \cdot 0,067 \quad d' = 11,7\text{cm.}
 \end{aligned}$$

Colocación de la 3ª esfera

$$\begin{aligned}
 \frac{a_1}{2} d^3 &= y \cdot d''^3 \\
 15,3^3 \cdot 0,015 &= d''^3 \cdot 0,037 \quad d'' = 11,3\text{cm}
 \end{aligned}$$

i) Comprobación de la bondad de la compensación

Condición: buque adrizado

$$\Delta NE = 0$$

$$\Delta SE = 0$$

$$\Delta SW = 0$$

$$\Delta NW = 0$$

$$D = 0$$

Condición: buque escorado

		Rumbos							
		N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Escoras	5° Er	0	0	0	0	0	0	0	0
	7°5 Er	0	0	0	0	0	0	0	0
	10° Er	0	0	0	0	0	0	0	0
	12°5 Er	0	0,5 +	0	0	0	0,5 +	0	0
	15° Er	0,5 +	1 +	0	0,5 -	0	0,5 +	0	0,5 -
	17°5 Er	1 +	2 +	0,5 -	1 -	0,5 +	1 +	0	1 -
	20° Er	1 +	3 +	1 -	3 -	0,5 +	2,5 +	0	3 -

		Rumbos							
		N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Escoras	5°Br	0	0	0	0	0	0	0	0
	7°5Br	0	0	0	0	0	0	0	0
	10°Br	0	0	0	0	0	0	0	0
	12°5Br	0	0,5 -	0	0	0	0,5 -	0	0
	15°Br	0,5 -	0,5 -	0	0,5 +	0	0,5 -	0	0,5 +
	17°5Br	0,5 -	1 -	0,5 +	1 +	0,5 -	1 -	0	1 +
	20°Br	1 -	3 -	1 +	3 +	0,5 -	2,5 -	0	3 +



EXPERIENCIA N° 2.2

a) Elementos introducidos en el desvioscopio.

2 barras de hierro dulce, efecto  $\bar{e}$

1 barra de hierro dulce, efecto  $\bar{a}$

1 barra de hierro dulce, efecto  $k+$ ; distancia al centro de la rosa = 14 cm.

b) Lectura de desvíos:

$$\Delta NE = 3+$$

$$\Delta SE = 3-$$

$$\Delta SW = 3+$$

$$\Delta NW = 3-$$

$$D = \frac{(\Delta NE + \Delta SW) - (\Delta SE + \Delta NW)}{4} \quad D = 3$$

c) Lectura de períodos y cálculo del coeficiente  $\lambda$ .

Periodo en tierra: 28 seg. (10 oscilaciones)

T al NE: 30 seg.

T al SE: 31 seg.

T al SW: 29 seg.

T al NW: 30 seg.

$$\lambda = \frac{1}{4} \left( \frac{T^2}{T_{NE}^2} \cos \Delta NE + \frac{T^2}{T_{SE}^2} \cos \Delta SE + \frac{T^2}{T_{SW}^2} \cos \Delta SW + \frac{T^2}{T_{NW}^2} \cos \Delta NW \right)$$

$$\lambda = 0,871$$

d) Cálculo de las varillas intervinientes y de  $\lambda_2$



$$\lambda = 1 + \frac{a+e}{2} \quad 0,871 = 1 + \frac{a+e}{2} \quad a+e = 0,091-$$

$$\text{sen } D = \frac{a+e}{2\lambda} \quad \text{sen } 2^\circ 4' = \frac{a+e}{2 \cdot 0,871} \quad a-e = 0,258-$$

$$a = 0,084-$$

$$e = 0,175-$$

$$a_1 = -\frac{1}{3}(a-e) \quad a_1 = 0,030-$$

$$e_1 = \frac{2}{3}(a-e) \quad e_1 = 0,061+$$

$$a_2 = a + a_1 \quad a_2 = 0,114-$$

$$e_2 = e + e_1 \quad e_2 = 0,114-$$

$$a_2 = e_2 = 0,114-$$

$$\lambda_2 = 1 + e_2 \quad \lambda_2 = 0,886$$

e) Anulación del coeficiente D (experimental):

Distancia de las esferas ( centro de la rosa a canto interno de la esfera) para anular el coeficiente D:

f) Cálculo del coeficiente J

Condición de rumbo: N

Condición de escora: 5° Er.

Lectura del desvío: 1°5-

$$-1,5 = J \cos 0 \quad J = 0,300-$$

Condición de rumbo: N

Condición de escora: 7°,5° Er.

Lectura del desvío: 2°-

$$-2 = J \cdot 7 \cos 0 \quad J = 0,267-$$

Condición de rumbo: N

Condición de escora: 10 Er.

Lectura del desvío: 3°-

$$-3^\circ = J \cdot 10 \cos 0 \quad J = 0,300$$

Condición de rumbo: S

Condición de escora: 5 Br.

Lectura del desvío: 1°,5-

$$-1^\circ,5 = J \cdot (-5) \cos 180 \quad J = 0,300-$$

Condición de rumbo: S

Condición de escora: 7°,5° Br.

Lectura del desvío: 2°5-

$$-2^\circ5 = J \cdot (-7,5) \cos 180 \quad J = 0,333-$$

Condición de rumbo: S

Condición de escora: 10 Br.

Lectura del desvío: 3°-

$$-3^\circ = J \cdot (-10) \cos 180 \quad J = 0,300-$$

Valor de J tomado para la presente experiencia: 0,300-

g) Cálculo de las varillas intervinientes

$$J = \frac{e_2 - k}{\lambda_2} \cdot \frac{Z}{H}$$

$$-0,300 \frac{-0,114 - k}{0,886} \cdot \frac{0,38}{0,235} \quad k = 0,050 +$$

k (buque + esferas) = 0,050+

k (esferas) = 0,030-

$$k \text{ (buque)} = 0,080+$$

$$x = \frac{k - e}{3} = \frac{0,080 - (-0,175)}{3} = 0,085 +$$

$$y = \frac{k - a}{3} = \frac{0,080 - (-0,084)}{3} = 0,055 +$$

$$a = 0,084-$$

$$e = 0,175-$$

$$k = 0,080+$$

$$-x = 0,085-$$

$$^2x = 0,170+$$

$$-x = 0,085-$$

$$^2y = 0,110+$$

$$-y = 0,055-$$

$$-y = 0,055-$$

$$a_T = 0,059-$$

$$e_T = 0,060-$$

$$k_T = 0,060-$$

$$a_T = e_T = k_T = 0,060-$$

h) Colocación de esferas Br/Er

$$a_1 d^3 = d'^3$$

$$15,3^3 \cdot 0,030 = d'^3 \cdot 0,085$$

$$d' = 10,8 \text{ cm}$$

Colocación de la 3ª esfera

$$\frac{a_2}{2} d^3 = y \cdot d''^3$$

$$0,015 \cdot 15,3^3 = 0,055 \cdot d''^3$$

$$d'' = 9,9 \text{ cm}$$

i) Comprobación de la bondad de la compensación

Condición: buque adrizado

$$\Delta NE = 0$$

$$\Delta SE = 0$$

$$\Delta SW = 0$$

$$\Delta NW = 0$$

$$D = 0$$

Condición: buque escorado

		Rumbos							
		N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Escoras	5° Er	0	0	0	0	0	0	0	0
	7°5 Er	0	0	0	0	0	0	0	0
	10° Er	0	0	0	0	0	0	0	0
	12°5 Er	0	0,5 +	0	0	0	0,5 +	0	0
	15° Er	0,5 +	1 +	0	0,5 -	0	0,5 +	0	0,5 -
	17°5 Er	1 +	2 +	0,5 -	1 -	0,5 +	1 +	0	1 -
	20° Er	1 +	3 +	1 -	3 -	0,5 +	3 +	0	3 -

		Rumbos							
		N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Escoras	5° Br	0	0	0	0	0	0	0	0
	7°5 Br	0	0	0	0	0	0	0	0
	10° Br	0	0	0	0	0	0	0	0
	12°5 Br	0	0,5 -	0	0	0	0,5 -	0	0
	15° Br	0,5 -	1 -	0	0,5 +	0	0,5 -	0	0,5 +
	17°5 Br	0,5 -	2 -	0,5 +	1 +	0,5 -	1 -	0	1 +
	20° Br	1 -	3 -	1 +	3 +	0,5 -	3 -	0	3 +





EXPERIENCIA N° 2.3

a) Elementos introducidos en el desvioscopio.

2 barras de hierro dulce, efecto  $\bar{e}$

1 barra de hierro dulce, efecto  $\bar{a}$

1 barra de hierro dulce, efecto  $k+$ ; distancia al centro de la rosa = 11 cm

b) Lectura de desvíos:

$$\Delta NE = 3+$$

$$\Delta SE = 3-$$

$$\Delta SW = 3+$$

$$\Delta NW = 3-$$

$$D = \frac{(\Delta NE + \Delta SW) - (\Delta SE + \Delta NW)}{4} \quad D = 3$$

c) Lectura de períodos y cálculo del coeficiente  $\lambda$ .

Periodo en tierra: 28 (10 oscilaciones)

T al NE: 30 seg.

T al SE: 31 seg.

T al SW: 29 seg.

T al NW: 30 seg.

$$\lambda = \frac{1}{4} \left( \frac{T^2}{T_{NE}^2} \cos \Delta NE + \frac{T^2}{T_{SE}^2} \cos \Delta SE + \frac{T^2}{T_{SW}^2} \cos \Delta SW + \frac{T^2}{T_{NW}^2} \cos \Delta NW \right)$$

$$\lambda = 0,871$$

d) Cálculo de las varillas intervinientes y de  $\lambda_2$

$$\lambda = 1 + \frac{a+e}{2} \quad 0,871 = 1 + \frac{a+e}{2} \quad a+e = 0,091-$$

$$\text{sen } D = \frac{a+e}{2\lambda} \quad \text{sen } 2^\circ 4' = \frac{a+e}{2 \cdot 0,871} \quad a-e = 0,258-$$

$$a = 0,084-$$

$$e = 0,175-$$

$$a_1 = -\frac{1}{3}(a-e) \quad a_1 = 0,030-$$

$$e_1 = \frac{2}{3}(a-e) \quad e_1 = 0,061+$$

$$a_2 = a + a_1 \quad a_1 = 0,114-$$

$$e_2 = e + e_1 \quad e_2 = 0,114-$$

$$a_2 = e_2 = 0,114-$$

$$\lambda_2 = 1 + e_2 \quad \lambda_2 = 0,886$$

e) Anulación del coeficiente D (experimental):

Distancia de las esferas ( centro de la rosa a canto interno de la esfera) para anular el coeficiente D:

f) Cálculo del coeficiente J

Condición de rumbo: N

Condición de escora:  $5^\circ$  Er.

Lectura del desvío:  $2^\circ$ -

$$-2 = J \cdot 5 \cos 0 \quad J = 0,400-$$

Condición de rumbo: N

Condición de escora:  $7^\circ,5^\circ$  Er.

Lectura del desvío: 3°-

$$-3^\circ = J \cdot 7,5 \cos 0 \quad J = 0,400-$$

Condición de rumbo: N

Condición de escora: 10 Er.

Lectura del desvío: 4°-

$$-4^\circ = J \cdot 10 \cos 0 \quad J = 0,400$$

Condición de rumbo: S

Condición de escora: 5 Br.

Lectura del desvío: 2°-

$$-2^\circ = J \cdot (-5) \cos 180 \quad J = 0,400-$$

Condición de rumbo: S

Condición de escora: 7°,5° Br.

Lectura del desvío: 3°-

$$-3^\circ = J \cdot (-7,5) \cos 180 \quad J = 0,400-$$

Condición de rumbo: S

Condición de escora: 10 Br.

Lectura del desvío: 4°-

$$-4^\circ = J \cdot (-10) \cos 180 \quad J = 0,400-$$

Valor de J tomado para la presente experiencia: 0,400-

g) Cálculo de las varillas intervinientes

$$J = \frac{e_2 - k}{\lambda_2} \cdot \frac{Z}{H}$$

$$-0,400 = \frac{-0,114 - k}{0,886} \cdot \frac{0,38}{0,235} \quad k = 0,105 +$$

k (buque + esferas) = 0,105+

$$k \text{ (esferas)} = 0,030-$$

$$k \text{ (buque)} = 0,135+$$

$$x = \frac{k - e}{3} = \frac{0,135 - (-0,175)}{3} = 0,103 +$$

$$y = \frac{k - a}{3} = \frac{0,135 - (-0,084)}{3} = 0,073 +$$

$$a = 0,084-$$

$$e = 0,175-$$

$$k = 0,135+$$

$$-x = 0,103-$$

$$2x = 0,106+$$

$$-x = 0,103-$$

$$2y = 0,146+$$

$$-y = 0,073-$$

$$-y = 0,073-$$

$$a_T = 0,041-$$

$$e_T = 0,042-$$

$$k_T = 0,041-$$

$$a_T = e_T = k_T = 0,041-$$

h) Colocación de esferas Br/Er

$$a_1 d^3 = x \cdot d'^3$$

$$15,3^3 \cdot 0,030 = d'^3 \cdot 0,130 \quad d' = 10,1 \text{ cm}$$

Colocación de la 3ª esfera

$$\frac{a_2}{2} d^3 = y \cdot d''^3$$

$$0,015 \cdot 15,3^3 = d''^3 \cdot 0,130 \quad d'' = 9,0 \text{ cm}$$

i) Comprobación de la bondad de la compensación

Condición: buque adrizado

$$\Delta NE = 0$$

$$\Delta SE = 0,5+$$

$\Delta SW = 0$

$\Delta NW = 0,5-$

$D = 0$

Condición: buque escorado

		Rumbos							
		N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Escoras	5° Er	0	0	0	0	0	0	0	0
	7°5 Er	0	0	0	0	0	0	0	0
	10° Er	0	0	0	0	0	0	0	0
	12°5 Er	0	1 +	0	0	0	1 +	0	0
	15° Er	0,5 +	1 +	0	0,5 -	0	1 +	0	0,5 -
	17°5 Er	1 +	2 +	0,5 -	1 -	0,5 +	2 +	0,5 +	1 -
	20° Er	1 +	3 +	1 -	3 -	0,5 +	3 +	0,5 +	3 -

		Rumbos							
		N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Escoras	5° Br	0	0	0	0	0	0	0	0
	7°5 Br	0	0	0	0	0	0	0	0
	10° Br	0	0	0	0	0	0	0	0
	12°5 Br	0	1 -	0	0	0	1 -	0	0
	15° Br	0,5 -	1 -	0	0,5 +	0	1 -	0	0,5 +
	17°5 Br	1 -	2 -	0,5 +	1 +	0,5 -	2 -	0	1 +
	20° Br	1 -	3 -	1 +	3 +	0,5 -	3 -	0,5 +	3 +





EXPERIENCIA N° 3.1

a) Elementos introducidos en el desvioscopio.

3 barras de hierro dulce, efecto  $\bar{e}$

1 barra de hierro dulce, efecto  $\bar{a}$

1 barra de hierro dulce, efecto  $k+$ ; distancia al centro de la rosa = 20 cm.

b) Lectura de desvíos:

$$\Delta NE = 3,5+$$

$$\Delta SE = 3,0+$$

$$\Delta SW = 3,5+$$

$$\Delta NW = 4,0+$$

$$D = \frac{(\Delta NE + \Delta SW) - (\Delta SE + \Delta NW)}{4}$$

$$D = 3,5+$$

c) Lectura de períodos y cálculo del coeficiente  $\lambda$ .

Periodo en tierra: 28 seg. (10 oscilaciones)

T al NE: 30 seg.

T al SE: 30 seg.

T al SW: 30 seg.

T al NW: 31 seg.

$$\lambda = \frac{1}{4} \left( \frac{T^2}{T_{NE}^2} \cos \Delta NE + \frac{T^2}{T_{SE}^2} \cos \Delta SE + \frac{T^2}{T_{SW}^2} \cos \Delta SW + \frac{T^2}{T_{NW}^2} \cos \Delta NW \right)$$

$$\lambda = \frac{1}{4} \left( \frac{28^2}{30^2} \cos 3,5 + \frac{28^2}{30^2} \cos 3,0 + \frac{28^2}{30^2} \cos 3,5 + \frac{28^2}{31^2} \cos 4 \right) = 0,856$$

d) Cálculo de las varillas intervinientes y de  $\lambda_2$

$$\lambda = 1 + \frac{a+e}{2} \quad 0,856 = 1 + \frac{a+e}{2} \quad a+e = 0,288-$$

$$\text{sen } D = \frac{a-e}{2\lambda} \quad \text{sen } 3^{\circ}4 = \frac{a-e}{2 \cdot 0,856} \quad a-e = 0,105+$$

$$a = 0,092-$$

$$e = 0,197-$$

$$a_1 = -\frac{1}{3}(a-e) \quad a_1 = 0,035-$$

$$e_1 = \frac{2}{3}(a-e) \quad e_1 = 0,070+$$

$$a_2 = a + a_1 \quad a_2 = 0,127-$$

$$e_2 = e + e_1 \quad e_2 = 0,127-$$

$$a_2 = e_2 = 0,127-$$

$$\lambda_2 = 1 + e_2 \quad \lambda_2 = 0,873$$

e) Anulación del coeficiente D (experimental):

Distancia de las esferas ( centro de la rosa a · canto interno de la esfera) para anular el coeficiente D: 14,8 cm

f) Cálculo del coeficiente J

Condición de rumbo: N

Condición de escora: 5° Er.

Lectura del desvío: 1°-

$$-1^{\circ} = J \cdot 5 \cos 0 \quad J = 0,200-$$

Condición de rumbo: N

Condición de escora: 7°,5° Er.

Lectura del desvío: 1°,5-

$$-1,5^\circ = J \cdot 7,5 \cos 0 \quad J = 0,200-$$

Condición de rumbo: N

Condición de escora: 10 Er.

Lectura del desvío: 2°-

$$-2^\circ = J \cdot 10 \cos 0 \quad J = 0,200$$

Condición de rumbo: S

Condición de escora: 5 Br.

Lectura del desvío: 1°-

$$-1^\circ = J \cdot (-5) \cos 180 \quad J = 0,200-$$

Condición de rumbo: S

Condición de escora: 7°,5° Br.

Lectura del desvío: 2°-

$$-2^\circ = J \cdot (-7,5) \cos 180 \quad J = 0,267-$$

Condición de rumbo: S

Condición de escora: 10 Br.

Lectura del desvío: 2°-

$$-2^\circ = J \cdot (-10) \cos 180 \quad J = 0,200-$$

Valor de J tomado para la presente experiencia: 0,200-

g) Cálculo de las varillas intervinientes

$$J = \frac{e_2 - k}{\lambda_2} \cdot \frac{Z}{H}$$

$$-0,200 = \frac{-0,127 - k}{0,873} \cdot \frac{0,38}{0,235} \quad k = 0,011-$$

k (buque + esferas) = 0,011-

$$k \text{ (esferas)} = 0,035-$$

$$k \text{ (buque)} = 0,024+$$

$$x = \frac{k - e}{3} = \frac{0,024 - (-0,197)}{3} = 0,074 +$$

$$y = \frac{k - a}{3} = \frac{0,024 - (-0,092)}{3} = 0,039 +$$

$$a = 0,092-$$

$$e = 0,197-$$

$$k = 0,016+$$

$$-x = 0,074-$$

$$2x = 0,148+$$

$$-x = 0,074-$$

$$2y = 0,078+$$

$$-y = 0,039-$$

$$-y = 0,039-$$

$$a_T = 0,088-$$

$$e_T = 0,088-$$

$$k_T = 0,089-$$

$$a_T = e_T = k_T = 0,088-$$

h) Colocación de esferas Br/Er

$$a_1 d^3 = x \cdot d'^3$$

$$0,035 \cdot 14,8^3 = 0,074 \cdot d'^3 \quad d' = 11,5 \text{ cm}$$

Colocación de la 3ª esfera

$$\frac{a_1}{2} d^3 = y \cdot d''^3$$

$$0,018 \cdot 14,8^3 = 0,039 \cdot d''^3 \quad d'' = 11,4 \text{ cm}$$

i) Comprobación de la bondad de la compensación

Condición: buque adrizado

$$\Delta NE = 0$$

$$\Delta SE = 0,5+$$

$$\Delta SW = 0$$

$$\Delta NW = 0,5-$$

$$D = 0$$



Condición: buque escorado

		Rumbos							
		N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
<b>Escoras</b>	<b>5° Er</b>	0	0	0	0	0	0	0	0
	<b>7°5 Er</b>	0	0	0	0	0	0	0	0
	<b>10° Er</b>	0	0	0	0	0	0	0	0
	<b>12°5 Er</b>	0	0,5 +	0	0	0	0,5 +	0	
	<b>15° Er</b>	0,5 +	1 +	0	0,5 -	0	0,5 +	0	0,5 -
	<b>17°5 Er</b>	1 +	2 +	0,5 -	1 -	0,5 +	2 +	0,5 +	1 -
	<b>20° Er</b>	1 +	3 +	1,5 -	3 -	1 +	3 +	1 +	2,5 -

		Rumbos							
		N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
<b>Escoras</b>	<b>5°Br</b>	0	0	0	0	0	0	0	0
	<b>7°5Br</b>	0	0	0	0	0	0	0	0
	<b>10°Br</b>	0	0	0	0	0	0	0	0
	<b>12°5Br</b>	0	0,5 -	0	0	0	0,5 -	0	
	<b>15°Br</b>	0,5 -	1 -	0	0,5 +	0	0,5 -	0	0,5 +
	<b>17°5Br</b>	1 -	2 -	0,5 +	1 +	0,5 -	2 -	0,5 -	1 +
	<b>20°Br</b>	1 -	3 -	1,5 +	3 +	0,5 -	2,5 -	0,5 +	2,5 +



EXPERIENCIA N° 3.2

a) Elementos introducidos en el desvioscopio.

3 barras de hierro dulce, efecto  $\bar{e}$

1 barra de hierro dulce, efecto  $\bar{a}$

1 barra de hierro dulce, efecto  $k+$ ; distancia al centro de la rosa = 14 cm.

b) Lectura de desvíos:

$$\Delta NE = 3,5+$$

$$\Delta SE = 3,0+$$

$$\Delta SW = 3,5+$$

$$\Delta NW = 4,0+$$

$$D = \frac{(\Delta NE + \Delta SW) - (\Delta SE + \Delta NW)}{4} \quad D = 3,5+$$

c) Lectura de períodos y cálculo del coeficiente  $\lambda$ .

Periodo en tierra: 28 seg. (10 oscilaciones)

T al NE: 30 seg.

T al SE: 30 seg.

T al SW: 30 seg.

T al NW: 31 seg.

$$\lambda = \frac{1}{4} \left( \frac{T^2}{T_{NE}^2} \cos \Delta NE + \frac{T^2}{T_{SE}^2} \cos \Delta SE + \frac{T^2}{T_{SW}^2} \cos \Delta SW + \frac{T^2}{T_{NW}^2} \cos \Delta NW \right)$$

$$\lambda = \frac{1}{4} \left( \frac{28^2}{30^2} \cos 3,5 + \frac{28^2}{30^2} \cos 3,0 + \frac{28^2}{30^2} \cos 3,5 + \frac{28^2}{31^2} \cos 4 \right) = 0,856$$

d) Cálculo de las varillas intervinientes y de  $\lambda_2$

$$\lambda = 1 + \frac{a+e}{2} \quad 0,856 = 1 + \frac{a+e}{2} \quad a+e = 0,288-$$

$$\text{sen } D = \frac{a-e}{2\lambda} \quad \text{sen } 3^{\circ}4 = \frac{a-e}{2 \cdot 0,856} \quad a-e = 0,105+$$

$$a = 0,092-$$

$$e = 0,197-$$

$$a_1 = -\frac{1}{3}(a-e) \quad a_1 = 0,035-$$

$$e_1 = \frac{2}{3}(a-e) \quad e_1 = 0,070+$$

$$a_2 = a + a_1 \quad a_2 = 0,127-$$

$$e_2 = e + e_1 \quad e_2 = 0,127-$$

$$a_2 = e_2 = 0,127-$$

$$\lambda_2 = 1 + e_2 \quad \lambda_2 = 0,873$$

e) Anulación del coeficiente D (experimental):

Distancia de las esferas ( centro de la rosa a · canto interno de la esfera) para anular el coeficiente D: 14,8 cm

f) Cálculo del coeficiente J

Condición de rumbo: N

Condición de escora: 5° Er.

Lectura del desvío: 1°,5-

$$-1^{\circ},5 = J \cos 0 \quad J = 0,300-$$

Condición de rumbo: N

Condición de escora: 7°,5° Er.

Lectura del desvío: 2°-

$$-2^{\circ} = J \cdot 7,5 \cos 0 \quad J = 0,300-$$

Condición de rumbo: N

Condición de escora: 10 Er.

Lectura del desvío: 3°-

$$-3^{\circ} = J \cdot 10 \cos 0 \quad J = 0,300$$

Condición de rumbo: S

Condición de escora: 5 Br.

Lectura del desvío: 1°5-

$$-1^{\circ}5 = J \cdot (-5) \cos 180 \quad J = 0,300-$$

Condición de rumbo: S

Condición de escora: 7°,5° Br.

Lectura del desvío: 2°5-

$$-2^{\circ}5 = J \cdot (-7,5) \cos 180 \quad J = 0,300-$$

Condición de rumbo: S

Condición de escora: 10 Br.

Lectura del desvío: 3°-

$$-3^{\circ} = J \cdot (-10) \cos 180 \quad J = 0,300-$$

Valor de J tomado para la presente experiencia: 0,300-

g) Cálculo de las varillas intervinientes

$$J = \frac{e_2 - k}{\lambda_2} \cdot \frac{Z}{H}$$

$$-0,300 \frac{-0,127 - k}{0,873} \cdot \frac{0,38}{0,235} \quad k = 0,035 -$$

k (buque + esferas) = 0,035+

k (esferas) = 0,035-



$$k \text{ (buque)} = 0,070 +$$

$$x = \frac{k - e}{3} = \frac{0,070 - (-0,197)}{3} = 0,089 +$$

$$y = \frac{k - a}{3} = \frac{0,070 - (-0,092)}{3} = 0,054 +$$

$$a = 0,092 - \quad e = 0,197 - \quad k = 0,070 +$$

$$-x = 0,089 - \quad {}^2x = 0,178 + \quad -x = 0,089 -$$

$${}^2y = 0,108 + \quad -y = 0,054 - \quad -y = 0,054 -$$

$$a_T = 0,073 - \quad e_T = 0,073 - \quad k_T = 0,073 -$$

$$a_T = e_T = k_T = 0,073 -$$

h) Colocación de esferas Br/Er

$$a_1 d^3 = x \cdot d'^3$$

$$0,035 \cdot 14,8^3 = 0,089 \cdot d'^3 \quad d' = 10,8 \text{ cm}$$

Colocación de la 3ª esfera

$$\frac{a_1}{2} d^3 = y \cdot d''^3$$

$$0,018 \cdot 14,8^3 = 0,054 \cdot d''^3 \quad d'' = 10,2 \text{ cm}$$

i) Comprobación de la bondad de la compensación

Condición: buque adrizado

$$\Delta NE = 0$$

$$\Delta SE = 0$$

$$\Delta SW = 0$$

$$\Delta NW = 0$$

$$D = 0$$

Condición: buque escorado

		Rumbos							
		N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Escoras	5° Er	0	0	0	0	0	0	0	0
	7°5 Er	0	0	0	0	0	0	0	0
	10° Er	0	0	0	0	0	0	0	0
	12°5 Er	0	1 +	0	0	0	0,5 +	0	0
	15° Er	0,5 +	1 +	0	0,5 -	0	0,5 +	0	0,5 -
	17°5 Er	1 +	2 +	0,5 -	1 -	0,5 +	2 +	0,5 +	1 -
	20° Er	1 +	3 +	1,5 -	3 -	1 +	3 +	1 +	2,5 -

		Rumbos							
		N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Escoras	5° Br	0	0	0	0	0	0	0	0
	7°5 Br	0	0	0	0	0	0	0	0
	10° Br	0	0	0	0	0	0	0	0
	12°5 Br	0	1 -	0	0	0	0,5 -	0	0
	15° Br	0,5 -	1 -	0	0,5 +	0	0,5 -	0	0,5 +
	17°5 Br	1 -	2 -	0,5 +	1 +	0,5 -	2 -	0,5 -	1 +
	20° Br	1 -	3 -	1,5 +	3 +	0,5 -	3 -	0'5 +	2,5 +



EXPERIENCIA N° 3.3

a) Elementos introducidos en el desvioscopio.

3 barras de hierro dulce, efecto  $\bar{e}$

1 barra de hierro dulce, efecto  $\bar{a}$

1 barra de hierro dulce, efecto  $k+$ ; distancia al centro de la rosa = 11 cm.

b) Lectura de desvíos:

$$\Delta NE = 3,5+$$

$$\Delta SE = 3,0+$$

$$\Delta SW = 3,5+$$

$$\Delta NW = 4,0+$$

$$D = \frac{(\Delta NE + \Delta SW) - (\Delta SE + \Delta NW)}{4} \quad D = 3,5+$$

c) Lectura de períodos y cálculo del coeficiente  $\lambda$ .

Periodo en tierra: 28 seg. (10 oscilaciones)

T al NE: 30 seg.

T al SE: 30 seg.

T al SW: 30 seg.

T al NW: 31 seg.

$$\lambda = \frac{1}{4} \left( \frac{T^2}{T_{NE}^2} \cos \Delta NE + \frac{T^2}{T_{SE}^2} \cos \Delta SE + \frac{T^2}{T_{SW}^2} \cos \Delta SW + \frac{T^2}{T_{NW}^2} \cos \Delta NW \right)$$

$$\lambda = \frac{1}{4} \left( \frac{28^2}{30^2} \cos 3,5 + \frac{28^2}{30^2} \cos 3,0 + \frac{28^2}{30^2} \cos 3,5 + \frac{28^2}{31^2} \cos 4 \right) = 0,856$$

d) Cálculo de las varillas intervinientes y de  $\lambda_2$

$$\lambda = 1 + \frac{a+e}{2} \quad 0,856 = 1 + \frac{a+e}{2} \quad a+e = 0,288-$$

$$\text{sen } D = \frac{a-e}{2\lambda} \quad \text{sen } 3^\circ 4' = \frac{a-e}{2 \cdot 0,856} \quad a-e = 0,105+$$

$$a = 0,092-$$

$$e = 0,197-$$

$$a_1 = -\frac{1}{3}(a-e) \quad a_1 = 0,035-$$

$$e_1 = \frac{2}{3}(a-e) \quad e_1 = 0,070+$$

$$a_2 = a + a_1 \quad a_2 = 0,127-$$

$$e_2 = e + e_1 \quad e_2 = 0,127-$$

$$a_2 = e_2 = 0,127-$$

$$\lambda_2 = 1 + e_2 \quad \lambda_2 = 0,873$$

e) Anulación del coeficiente D (experimental):

Distancia de las esferas ( centro de la rosa a · canto interno de la esfera) para anular el coeficiente D: 14,8 cm

f) Cálculo del coeficiente J

Condición de rumbo: N

Condición de escora: 5° Er.

Lectura del desvío: 2°-

$$-2^\circ = J \cdot 5 \cos 0 \quad J = 0,400-$$

Condición de rumbo: N

Condición de escora: 7°,5° Er.



Lectura del desvío: 3°-

$$-3^\circ = J \cdot 7,5 \cos 0 \quad J = 0,400-$$

Condición de rumbo: N

Condición de escora: 10 Er.

Lectura del desvío: 4°-

$$-4^\circ = J \cdot 10 \cos 0 \quad J = 0,400$$

Condición de rumbo: S

Condición de escora: 5 Br.

Lectura del desvío: 2°-

$$-2^\circ = J \cdot (-5) \cos 0 \quad J = 0,400-$$

Condición de rumbo: S

Condición de escora: 7°,5° Br.

Lectura del desvío: 3°-

$$-3^\circ = J \cdot (-7,5) \cos 0 \quad J = 0,400-$$

Condición de rumbo: S

Condición de escora: 10 Br.

Lectura del desvío: 4°-

$$-4^\circ = J \cdot (-10) \cos 0 \quad J = 0,400-$$

Valor de J tomado para la presente experiencia: 0,400-

g) Cálculo de las varillas intervinientes

$$J = \frac{e_2 - k}{\lambda_2} \cdot \frac{Z}{H}$$

$$-0,400 = \frac{-0,127 - k}{0,873} \cdot \frac{0,38}{0,253} \quad k = 0,089+$$

$$k \text{ (buque + esferas)} = 0,089+$$

$$k \text{ (esferas)} = 0,035-$$

$$k \text{ (buque)} = 0,124+$$

$$x = \frac{k - e}{3} = \frac{0,124 - (-0,197)}{3} = 0,107 +$$

$$y = \frac{k - a}{3} = \frac{0,124 - (-0,092)}{3} = 0,072 +$$

$$a = 0,092-$$

$$e = 0,197-$$

$$k = 0,124+$$

$$-x = 0,107-$$

$$^2x = 0,214+$$

$$-x = 0,107-$$

$$^2y = 0,144+$$

$$-y = 0,072-$$

$$-y = 0,072-$$

$$a_T = 0,055-$$

$$e_T = 0,055-$$

$$k_T = 0,055-$$

$$a_T = e_T = k_T = 0,055-$$

h) Colocación de esferas Br/Er

$$a_1 d^3 = x \cdot d'^3$$

$$0,035 \cdot 14,8^3 = 0,107 \cdot d'^3 \quad d' = 10,2 \text{ cm}$$

Colocación de la 3ª esfera

$$\frac{a_2}{2} d^3 = y \cdot d''^3$$

$$0,018 \cdot 14,8^3 = 0,072 \cdot d''^3 \quad d'' = 9,2 \text{ cm}$$

i) Comprobación de la bondad de la compensación

Condición: buque adrizado

		Rumbos							
		N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Escoras	5° Er	0	0	0	0	0	0	0	0
	7°5 Er	0	0	0	0	0	0	0	0
	10° Er	0	0	0	0	0	0	0	0
	12°5 Er	0	1 +	0	0,5 -	0	1 +	0	0,5 -
	15° Er	0,5 +	1 +	0	0,5 -	0	1 +	0	1 -
	17°5 Er	1 +	2 +	0,5 -	1 -	0,5 +	2.+	0,5 +	2 -
	20° Er	1 +	3 +	1,5 -	3 -	1 +	3 +	1 +	3 -

		Rumbos							
		N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Escoras	5° Br	0	0	0	0	0	0	0	0
	7°5 Br	0	0	0	0	0	0	0	0
	10° Br	0	0	0	0	0	0	0	0
	12°5 Br	0	1 -	0	0,5 +	0	1 -	0	0,5 +
	15° Br	0,5 -	1 -	0	0,5 +	0	1 -	0	1 +
	17°5 Br	1 -	2 -	0,5 +	1 +	0,5 -	2.-	0,5 -	2 +
	20° Br	1 -	3 -	1,5 +	3 +	0,5 -	3 -	0,5 +	3 +



EXPERIENCIA N° 4.1

a) Elementos introducidos en el desvioscopio.

4 barras de hierro dulce, efecto  $\bar{e}$

1 barra de hierro dulce, efecto  $\bar{a}$

1 barra de hierro dulce, efecto  $k+$ ; distancia al centro de la rosa = 20 cm.

b) Lectura de desvíos:

$$\Delta NE = 4^\circ +$$

$$\Delta SE = 3^\circ,5 +$$

$$\Delta SW = 4^\circ +$$

$$\Delta NW = 4^\circ +$$

$$D = \frac{(\Delta NE + \Delta SW) - (\Delta SE + \Delta NW)}{4} \quad D = 3,9 +$$

c) Lectura de períodos y cálculo del coeficiente  $\lambda$ .

Periodo en tierra: 28 seg. (10 oscilaciones)

T al NE: 31 seg.

T al SE: 30 seg.

T al SW: 31 seg.

T al NW: 30 seg.

$$\lambda = \frac{1}{4} \left( \frac{T^2}{T_{NE}^2} \cos \Delta NE + \frac{T^2}{T_{SE}^2} \cos \Delta SE + \frac{T^2}{T_{SW}^2} \cos \Delta SW + \frac{T^2}{T_{NW}^2} \cos \Delta NW \right)$$

$$\lambda = \frac{1}{4} \left( \frac{28^2}{31^2} \cos 4 + \frac{28^2}{30^2} \cos 3,5 + \frac{28^2}{31^2} \cos 4 + \frac{28^2}{30^2} \cos 4 \right) = 0,842$$



d) Cálculo de las varillas intervinientes y de  $\lambda_2$

$$\lambda = 1 + \frac{a+e}{2} \quad 0,842 = 1 + \frac{a+e}{2} \quad a+e = 0,316-$$

$$\text{sen } D = \frac{a-e}{2\lambda} \quad \text{sen } 3^{\circ}9' = \frac{a-e}{2 \cdot 0,856} \quad a-e = 0,114+$$

$$a = 0,101-$$

$$e = 0,215-$$

$$a_1 = -\frac{1}{3}(a-e) \quad a_1 = 0,038-$$

$$e_1 = \frac{2}{3}(a-e) \quad e_1 = 0,076+$$

$$a_2 = a + a_1 \quad a_2 = 0,139-$$

$$e_2 = e + e_1 \quad e_2 = 0,139-$$

$$a_2 = e_2 = 0,139-$$

$$\lambda_2 = 1 + e_2 \quad \lambda_2 = 0,861$$

e) Anulación del coeficiente D (experimental):

Distancia de las esferas ( centro de la rosa a · canto interno de la esfera) para anular el coeficiente D: 14,0 cm

f) Cálculo del coeficiente J

Condición de rumbo: N

Condición de escora: 5° Er.

Lectura del desvío: 1°-

$$-1^{\circ} = J \cdot 5 \cos 0 \quad J = 0,200-$$

Condición de rumbo: N

Condición de escora: 7°5 Er.

Lectura del desvío: 2°-

$$-2^{\circ} = J \cdot 7,5 \cos 0 \quad J = 0,267-$$

Condición de rumbo: N

Condición de escora: 10 Er.

Lectura del desvío: 2°-

$$-2^{\circ} = J \cdot 10 \cos 0 \quad J = 0,200$$

Condición de rumbo: S

Condición de escora: 5 Br.

Lectura del desvío: 1°-

$$-1^{\circ} = J \cdot (-5) \cos 180 \quad J = 0,200-$$

Condición de rumbo: S

Condición de escora: 7°,5° Br.

Lectura del desvío: 2°-

$$-2^{\circ} = J \cdot (-7,5) \cos 180 \quad J = 0,267-$$

Condición de rumbo: S

Condición de escora: 10 Br.

Lectura del desvío: 2°-

$$-2^{\circ} = J \cdot (-10) \cos 180 \quad J = 0,200-$$

Valor de J tomado para la presente experiencia: 0,228-

g) Cálculo de las varillas intervinientes

$$J = \frac{e_2 - k}{\lambda_2} \cdot \frac{Z}{H}$$

$$-0,228 = \frac{-0,139 - k}{0,861} \cdot \frac{0,38}{0,235} \quad k = -0,018$$

k (buque + esferas) = 0,018-

$$k \text{ (esferas)} = 0,038-$$

$$k \text{ (buque)} = 0,020+$$

$$x = \frac{k - e}{3} = \frac{0,020 - (-0,215)}{3} = 0,078 +$$

$$y = \frac{k - a}{3} = \frac{0,020 - (-0,101)}{3} = 0,040 +$$

$$a = 0,101-$$

$$e = 0,215-$$

$$k = 0,020+$$

$$-x = 0,078-$$

$$2x = 0,156+$$

$$-x = 0,078-$$

$$2y = 0,080+$$

$$-y = 0,040-$$

$$-y = 0,040-$$

$$a_T = 0,099-$$

$$e_T = 0,099-$$

$$k_T = 0,098-$$

$$a_T = e_T = k_T = 0,099-$$

h) Colocación de esferas Br/Er

$$a_1 d^3 = x \cdot d'^3$$

$$0,038 \cdot 14^3 = 0,078 \cdot d'^3$$

$$d' = 11,0 \text{ cm}$$

Colocación de la 3ª esfera

$$\frac{a_2}{2} d^3 = y \cdot d''^3$$

$$0,019 \cdot 14^3 = 0,040 \cdot d''^3$$

$$d'' = 10,9 \text{ cm}$$

i) Comprobación de la bondad de la compensación

Condición: buque adrizado

$$\Delta NE = 0$$

$$\Delta SE = 0,5-$$

$$\Delta SW = 0$$

$$\Delta NW = 0$$

$$D = 0,1+$$

Condición: buque escorado

		Rumbos							
		N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Escoras	5° Er	0	0	0	0	0	0	0	0
	7°5 Er	0	0	0	0	0	0	0	0
	10° Er	0	0	0	0	0	0	0	0
	12°5 Er	0	0,5 +	0	0	0	0,5 +	0	0
	15° Er	0,5 +	1 +	0	0,5 -	0	0,5 +	0	0,5 -
	17°5 Er	1 +	2 +	0,5 -	1 -	0,5 +	1 +	0,5 +	1 -
	20° Er	1 +	3 +	1,5 -	3 -	0,5 +	2,5 +	0,5 +	3 -

		Rumbos							
		N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Escoras	5° Br	0	0	0	0	0	0	0	0
	7°5 Br	0	0	0	0	0	0	0	0
	10° Br	0	0	0	0	0	0	0	0
	12°5 Br	0	0,5 -	0	0	0	0,5 -	0	0
	15° Br	0,5 -	1 -	0	0,5 +	0	1 -	0	0,5 +
	17°5 Br	1 -	2 -	0,5 +	1 +	0,5 -	1 -	0,5 -	1 +
	20° Br	1 -	3 -	1 +	3 +	0,5 -	2,5 -	0,5 +	3 +





EXPERIENCIA N° 4.2

a) Elementos introducidos en el desvioscopio.

4 barras de hierro dulce, efecto  $\bar{e}$

1 barra de hierro dulce, efecto  $\bar{a}$

1 barra de hierro dulce, efecto  $k+$ ; distancia al centro de la rosa = 14 cm.

b) Lectura de desvíos:

$$\Delta NE = 4^\circ +$$

$$\Delta SE = 3^\circ,5 +$$

$$\Delta SW = 4^\circ +$$

$$\Delta NW = 4^\circ +$$

$$D = \frac{(\Delta NE + \Delta SW) - (\Delta SE + \Delta NW)}{4} \quad D = 3,9 +$$

c) Lectura de períodos y cálculo del coeficiente  $\lambda$ .

Periodo en tierra: 28 seg. (10 oscilaciones)

T al NE: 31 seg.

T al SE: 30 seg.

T al SW: 31 seg.

T al NW: 30 seg.

$$\lambda = \frac{1}{4} \left( \frac{T^2}{T_{NE}^2} \cos \Delta NE + \frac{T^2}{T_{SE}^2} \cos \Delta SE + \frac{T^2}{T_{SW}^2} \cos \Delta SW + \frac{T^2}{T_{NW}^2} \cos \Delta NW \right)$$

$$\lambda = \frac{1}{4} \left( \frac{28^2}{31^2} \cos 4 + \frac{28^2}{30^2} \cos 3,5 + \frac{28^2}{31^2} \cos 4 + \frac{28^2}{30^2} \cos 4 \right) = 0,842$$

d) Cálculo de las varillas intervinientes y de  $\lambda_2$

$$\lambda = 1 + \frac{a+e}{2} \quad 0,842 = 1 + \frac{a+e}{2} \quad a+e = 0,316-$$

$$\text{sen } D = \frac{a-e}{2\lambda} \quad \text{sen } 3^{\circ}9' = \frac{a-e}{2 \cdot 0,856} \quad a-e = 0,114+$$

$$a = 0,101-$$

$$e = 0,215-$$

$$a_1 = -\frac{1}{3}(a-e) \quad a_1 = 0,038-$$

$$e_1 = \frac{2}{3}(a-e) \quad e_1 = 0,076+$$

$$a_2 = a + a_1 \quad a_2 = 0,139-$$

$$e_2 = e + e_1 \quad e_2 = 0,139-$$

$$a_2 = e_2 = 0,139-$$

$$\lambda_2 = 1 + e_2 \quad \lambda_2 = 0,861$$

e) Anulación del coeficiente D (experimental):

Distancia de las esferas ( centro de la rosa a · canto interno de la esfera) para anular el coeficiente D: 14,0 cm

f) Cálculo del coeficiente J

Condición de rumbo: N

Condición de escora: 5° Er.

Lectura del desvío: 1°5-

$$-1^{\circ}5' = J \cdot 5 \cos 0 \quad J = 0,300-$$

Condición de rumbo: N

Condición de escora: 7°5 Er.

Lectura del desvío: 2°5-

$$-2^{\circ},5 = J \, 7^{\circ},5 \cos 0 \quad J = 0,333-$$

Condición de rumbo: N

Condición de escora: 10 Er.

Lectura del desvío: 3°-

$$-3^{\circ} = J \cdot 10 \cos 0 \quad J = 0,300-$$

Condición de rumbo: S

Condición de escora: 5 Br.

Lectura del desvío: 1°5-

$$-1^{\circ}5 = J \cdot (-5) \cos 180 \quad J = 0,300-$$

Condición de rumbo: S

Condición de escora: 7°5 Br.

Lectura del desvío: 2°5-

$$-2^{\circ},5 = J (-7,5) \cos 180 \quad J = 0,333-$$

Condición de rumbo: S

Condición de escora: 10 Br.

Lectura del desvío: 3°-

$$-3^{\circ} = J \cdot (-10) \cos 180 \quad J = 0,300-$$

Valor de J tomado para la presente experiencia: 0,311-

g) Cálculo de las varillas intervinientes

$$J = \frac{e_2 - k}{\lambda_2} \frac{Z}{H}$$

$$-0,311 = \frac{-0,139 - k}{0,861} \cdot \frac{0,38}{0,235} \quad k = 0,027+$$

k (buque + esferas) = 0,027+

k (esferas) = 0,038-

$$k(\text{buque}) = 0,065 +$$

$$x = \frac{k - e}{3} = \frac{0,065 - (-0,215)}{3} = 0,093 +$$

$$y = \frac{k - a}{3} = \frac{0,065 - (-0,101)}{3} = 0,055 +$$

$$a = 0,101 - \quad e = 0,215 - \quad k = 0,065 +$$

$$-x = 0,093 - \quad 2x = 0,186 + \quad -x = 0,093 -$$

$$^2y = 0,110 + \quad -y = 0,055 - \quad -y = 0,055 -$$

$$a_T = 0,084 - \quad e_T = 0,084 - \quad k_T = 0,083 -$$

$$a_T = e_T = k_T = 0,084 -$$

h) Colocación de esferas Br/Er

$$a_1 d^3 = x \cdot d'^3$$

$$0,038 \cdot 14^3 = 0,093 \cdot d'^3 \quad d' = 10,4 \text{ cm}$$

Colocación de la 3ª esfera

$$\frac{a_2}{2} d^3 = y \cdot d''^3$$

$$0,019 \cdot 14^3 = 0,055 \cdot d''^3 \quad d'' = 9,8 \text{ cm}$$

i) Comprobación de la bondad de la compensación

Condición: buque adrizado

$$\Delta NE = 0$$

$$\Delta SE = 0,5 -$$

$$\Delta SW = 0$$

$$\Delta NW = 0 \quad D = 0,1 +$$

Condición: buque escorado

		Rumbos							
		N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Escoras	5° Er	0	0	0	0	0	0	0	0
	7°5 Er	0	0	0	0	0	0	0	0
	10° Er	0	0	0	0	0	0	0	0
	12°5 Er	0	1 +	0	0	0	0,5 +	0	0
	15° Er	0,5 +	1 +	0	0,5 -	0	0,5 +	0	0,5 -
	17°5 Er	1 +	2 +	0,5 -	1 -	0,5 +	2 +	0,5 +	2 -
	20° Er	1 +	3 +	1 -	3 -	0,5 +	2,5 +	0,5 +	3 -

		Rumbos							
		N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Escoras	5°Br	0	0	0	0	0	0	0	0
	7°5Br	0	0	0	0	0	0	0	0
	10°Br	0	0	0	0	0	0	0	0
	12°5Br	0	1 -	0	0	0	0,5 -	0	0
	15°Br	0,5 -	1 -	0	0,5 +	0	0,5 -	0	0,5 +
	17°5Br	1 -	2 -	0,5 +	1 +	0,5 -	2 -	0,5 -	2 +
	20°Br	1 -	3 -	1 +	3 +	0,5 -	3 -	0,5 +	3 +





EXPERIENCIA N° 4.3

a) Elementos introducidos en el desvioscopio.

4 barras de hierro dulce, efecto  $\bar{e}$

1 barra de hierro dulce, efecto  $\bar{a}$

1 barra de hierro dulce, efecto  $k+$ ; distancia al centro de la rosa = 11 cm.

b) Lectura de desvíos:

$$\Delta NE = 4^{\circ}+$$

$$\Delta SE = 3^{\circ},5+$$

$$\Delta SW = 4^{\circ}+$$

$$\Delta NW = 4^{\circ}+$$

$$D = \frac{(\Delta NE + \Delta SW) - (\Delta SE + \Delta NW)}{4} \quad D = 3,9+$$

c) Lectura de períodos y cálculo del coeficiente  $\lambda$ .

Periodo en tierra: 28 seg. (10 oscilaciones)

T al NE: 31 seg.

T al SE: 30 seg.

T al SW: 31 seg.

T al NW: 30 seg.

$$\lambda = \frac{1}{4} \left( \frac{T^2}{T_{NE}^2} \cos \Delta NE + \frac{T^2}{T_{SE}^2} \cos \Delta SE + \frac{T^2}{T_{SW}^2} \cos \Delta SW + \frac{T^2}{T_{NW}^2} \cos \Delta NW \right)$$

$$\lambda = \frac{1}{4} \left( \frac{28^2}{31^2} \cos 4 + \frac{28^2}{30^2} \cos 3,5 + \frac{28^2}{31^2} \cos 4 + \frac{28^2}{30^2} \cos 4 \right) = 0,842$$

d) Cálculo de las varillas intervinientes y de  $\lambda_2$

$$\lambda = 1 + \frac{a+e}{2} \quad 0,842 = 1 + \frac{a+e}{2} \quad a+e = 0,316-$$

$$\text{sen } D = \frac{a-e}{2\lambda} \quad \text{sen } 3^{\circ}9' = \frac{a-e}{2,0,856} \quad a-e = 0,114+$$

$$a = 0,101-$$

$$e = 0,215-$$

$$a_1 = -\frac{1}{3}(a-e) \quad a_1 = 0,038-$$

$$e_1 = \frac{2}{3}(a-e) \quad e_1 = 0,076+$$

$$a_2 = a + a_1 \quad a_2 = 0,139-$$

$$e_2 = e + e_1 \quad e_2 = 0,139-$$

$$a_2 = e_2 = 0,139-$$

$$\lambda_2 = 1 + e_2 \quad \lambda_2 = 0,861$$

e) Anulación del coeficiente D (experimental):

Distancia de las esferas ( centro de la rosa a · canto interno de la esfera) para anular el coeficiente D: 14,0 cm

f) Cálculo del coeficiente J

Condición de rumbo: N

Condición de escora: 5° Er.

Lectura del desvío: 2°-

$$-2^{\circ} = J \, 5 \cos 0 \quad J = 0,400-$$

Condición de rumbo: N

Condición de escora: 7°5 Er.

Lectura del desvío: 3°-

$$-3^{\circ} = J \, 7^{\circ}5 \cos 0 \quad J = 0,400-$$

Condición de rumbo: N

Condición de escora: 10 Er.

Lectura del desvío: 4°-

$$-4^{\circ} = J \cdot 10 \cos 0 \quad J = 0,400-$$

Condición de rumbo: S

Condición de escora: 5 Br.

Lectura del desvío: 2°-

$$-2^{\circ} = J \cdot (-5) \cos 180 \quad J = 0,400-$$

Condición de rumbo: S

Condición de escora: 7°,5° Br.

Lectura del desvío: 3°-

$$-3^{\circ} = J \cdot (-7,5) \cos 180 \quad J = 0,400-$$

Condición de rumbo: S

Condición de escora: 10 Br.

Lectura del desvío: 4°-

$$-4^{\circ} = J \cdot (-10) \cos 180 \quad J = 0,400-$$

Valor de J tomado para la presente experiencia: 0,400-

g) Cálculo de las varillas intervinientes

$$J = \frac{e_2 - k}{\lambda_2} \cdot \frac{Z}{H}$$

$$-0,400 = \frac{-0,139 - k}{0,861} \cdot \frac{0,38}{0,235} \quad k = 0,074+$$

$$k (\text{buque} + \text{esferas}) = 0,074+$$

$$k (\text{esferas}) = 0,038-$$

$$k (\text{buque}) = 0,112+$$

$$x = \frac{k - e}{3} = \frac{0,085 - (-0,215)}{3} = 0,109 +$$

$$y = \frac{k - a}{3} = \frac{0,085 - (-0,101)}{3} = 0,071 +$$

$$a = 0,101- \quad e = 0,215- \quad k = 0,112+$$

$$-x = 0,109- \quad 2x = 0,218+ \quad -x = 0,109-$$

$$2y = 0,142+ \quad -y = 0,071- \quad -y = 0,071-$$

$$a_T = 0,068- \quad e_T = 0,068- \quad k_T = 0,068-$$

$$a_T = e_T = k_T = 0,068-$$

h) Colocación de esferas Br/Er

$$a_1 d^3 = x \cdot d'^3$$

$$0,038 \cdot 14^3 = 0,109 \cdot d'^3 \quad d' = 9,9 \text{ cm}$$

Colocación de la 3ª esfera

$$\frac{a_2}{2} d^3 = y \cdot d''^3$$

$$0,019 \cdot 14^3 = 0,071 \cdot d''^3 \quad d'' = 9,0 \text{ cm}$$

i) Comprobación de la bondad de la compensación

Condición: buque adrizado

$$\Delta NE = 0$$

$$\Delta SE = 0,5-$$

$$\Delta SW = 0$$

$$\Delta NW = 0 \quad D = 0,1+$$

Condición: buque escorado



		Rumbos							
		N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Escoras	5° Er	0	0	0	0	0	0	0	0
	7°5 Er	0	0	0	0	0	0	0	0
	10° Er	0	0	0	0	0	0	0	0
	12°5 Er	0	1 +	0	0,5 -	0	1 +	0	0,5 -
	15° Er	0,5 +	1 +	0	0,5 -	0	1 +	0	1 -
	17°5 Er	1 +	2 +	0,5 -	2 -	0,5 +	2 +	0,5 +	2 -
	20° Er	1 +	3 +	1,5 -	3 -	0,5 +	3 +	0,5 +	3 -

		Rumbos							
		N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Escoras	5° Br	0	0	0	0	0	0	0	0
	7°5 Br	0	0	0	0	0	0	0	0
	10° Br	0	0	0	0	0	0	0	0
	12°5 Br	0	1 -	0	0,5 +	0	1 -	0	0,5 +
	15° Br	0,5 -	1 -	0	0,5 +	0	1 -	0	1 +
	17°5 Br	1 -	2 -	0,5 +	2 +	0,5 -	2 -	0,5 -	2 +
	20° Br	1 -	3 -	1 +	3 +	0,5 -	3 -	0,5 +	3 +



## **CAPITULO V.– CONCLUSIONES Y DIRECTRICES DE LAS FUTURAS INVESTIGACIONES**



## **1.- CONCLUSIONES**





## 1.1.– CONCLUSIONES INICIALES

### 1.1.1.– CONSIDERACIONES GENERALES

En el presente capítulo se especifican y destacan las principales conclusiones que se derivan del Trabajo de Investigación abordado. Se han clasificado las diversas aseveraciones en parcelas adosadas no sólo con el objetivo final de disgregar matices, sino también con el ánimo de plasmar, de la mejor forma posible, la declaración formal de los diferentes resultados, dado que existe una interrelación entre las diversas fases de la Investigación y los logros que se han ido produciendo.

La necesidad de llevar un rumbo seguro siempre ha sido la gran empresa del navegante y no ha regateado esfuerzos en buscar el modo y la forma de obtener una respuesta acorde a sus necesidades. Hoy, analizando el pasado más inmediato, se está potenciando el devenir de nacientes técnicas enganchadas de lleno en la parcela reservada para la instrumentación electrónica, sin obviar el empleo de la aguja náutica. Otros problemas pero con el mismo protagonista sugieren nuevas investigaciones, para esclarecer aspectos vinculantes y sobre todo, para discernir competencias en el más amplio de los sentidos.

### 1.1.2.– CONCLUSIONES PREVIAS

#### A.– CONCLUSIONES PREVIAS RELATIVAS A LA DETERMINACIÓN DE LOS DESVÍOS Y SU CONFIGURACION.

Desde los primeros pasos de las Ciencias hasta los conocimientos durante el siglo XIX, se han seguido líneas evolutivas de investigación tendentes en una primera etapa a la determinación del rumbo adecuado, abandonándose todas aquéllas que no tenían este objetivo y que en todo caso sólo tienen vigencia de forma testimonial.

Con la aparición de los buques de hierro, se puso en evidencia la necesidad de satisfacer unas necesidades, aprovechando toda iniciativa que la técnica aporta, permitiendo que un sistema prioritariamente conformado para navegación, sirva para realizar precisas determinaciones del rumbo de la nave.

El conocimiento profundo de los parámetros magnéticos y los condicionantes que categorizan la construcción naval, así como el análisis de las perturbaciones que originan las distintas clases de hierros, son esenciales para la determinación de la orientación de la aguja náutica.

## B.– CONCLUSIONES PREVIAS RELATIVAS A LA CONSTITUCION DEL SISTEMA DE COMPENSACIÓN.

El análisis de los sistemas de construcción y las componentes fundamentales de las distintas clases de hierros, permiten conocer y fortalecer los conceptos sobre las diferentes partes integradoras del sistema.

Se puede afirmar que los establecimientos de sistemas de compensar descritos y tratados, dan respuesta a las más duras exigencias de las precisiones utilizadas. Las metodologías clásicas determinan la operatividad del sistema, ya se trate de magnetismo accidental o permanente. Los tratamientos de cálculo quedan analizados y se demuestra su completa idoneidad.

## C.– CONCLUSIONES PREVIAS SOBRE LA FUNCIONALIDAD DE LAS OBSERVACIONES MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DEL DESVIOSCOPIO

Se puede afirmar con rotundidad que en la realidad la determinación de los desvíos se puede realizar por medio de un desvioscopio, creando el campo magnético adecuado y permitiendo una adecuada anulación de éstos sin ninguna ambigüedad, quedando perfectamente definido el campo magnético de los elementos compensadores.

El enganche referencial del sistema empleado por el desvioscopio debe de llegar a configurar un enlace compacto con el magnetismo observado en un buque en un sistema referencial biunívoco, tal que hiciera corresponder a los desvíos creados en el mismo una figura de aproximación de los observados a bordo.

Dentro de la diversidad de los sistemas de desvioscopios actuales, el más utilizado es el desvioscopio Cooke Beal, de utilización prácticamente generalizada en las enseñanzas náuticas.

A través de lo desarrollado en el presente Trabajo de Investigación queda patente que el mencionado desvioscopio adolece de unos sistematismos que aunque acotados y esperados, no obedecen a una ley reglada a partir de escoras superiores a  $10^\circ$ , tal como acontece en la realidad observada y conforme a la teoría expuesta.



## D.- CONCLUSIONES PREVIAS RELATIVAS A LA CONFIGURACION DE LOS DIFERENTES MODELOS TEÓRICOS DE COMPENSACIÓN.

Desde hace más de un siglo, se investiga la influencia de las distintas clases de hierros en su faceta de distorsionar la correcta dirección de la aguja náutica, haciendo variar la orientación de la misma del Norte magnético.

En el objetivo de lograr unos correctores adecuados que respondan a coeficientes determinados, uno de los problemas fundamentales que se presenta es el de evaluar la composición de las distintas clases de hierros intervinientes.

En la actualidad no está totalmente resuelto el problema ante la dificultad de poder cuantificar la realidad cambiante, tanto por el empleo de nuevos materiales como por su distribución asimétrica, y también por construcción o por el emplazamiento de la bitácora fuera del plano longitudinal. La cuantificación de los coeficientes se sigue realizando hoy día a través de modelos, ya clásicos, obteniendo registros de los mismos caracterizados por una banda de incertidumbre, todavía sin fijar de manera absoluta.

Todos los modelos matemáticos parten de las mismas hipótesis de comportamiento de los materiales intervinientes, reproduciendo lo mejor posible el efecto de los mismos sobre la aguja.

Los modelos matemáticos están organizados de forma que los efectos a anular estén por debajo de unos valores pequeños, siendo necesario efectuar previamente una compensación preliminar o aproximada de los desvíos.

## E.- CONCLUSIONES PREVIAS RELATIVAS A LA AUSCULTACION DE LAS EXPERIENCIAS OBJETO DE ANALISIS

Analizados las diversas experiencias propuestas en la Tesis se han obtenido los aspectos más significativos dejados al descubierto por los mismos y que en cierta medida dictaminan la idoneidad de las mismas.

De los resultados proporcionados por cada experiencia de forma individual, fijando las varillas transversales (e-), cada experiencia es capaz de dar una respuesta coherente en la distancia a que se deben colocar las esferas. Esta respuesta es coincidente para los diferentes resultados predeterminados analíticamente.

Cambiando los valores de la varilla vertical ( $k+$ ) cada experiencia vuelve a dar idéntica coherencia en la distancia a que se deben colocar las esferas, estando también en consonancia con los resultados predeterminados analíticamente.

Cada experiencia proporciona una respuesta ajustada de corrección del desvío de escora a los diversos rumbos cardinales y cuadrantales, no observándose desvíos en tanto dicha escora no supere los  $10^\circ$ , en completa coherencia con la teoría desarrollada.



## 1.2.– CONCLUSIONES FINALES

### A.– CONCLUSIONES RELATIVAS AL COMPORTAMIENTO INDIVIDUALIZADO DE LOS MODELOS DE CONDUCTA EN RELACION CON EL CALCULO DE LA LA DISTANCIA TEÓRICA

Después de las experiencias realizadas, una vez determinadas las distancia calculadas para efectuar la corrección del desvío cuadrantal y del desvío de escora, son inmediatas las conclusiones siguientes, avaladas por los resultados mostrados en el correspondiente Anexo que figura en las páginas finales de esta Tesis en forma gráfica.

- a) Para las escoras inferiores a  $10^{\circ}$  observadas en la presente Investigación, los valores de la corrección calculados a través de los modelos matemáticos dan una respuesta de total anulación del desvío cuadrantal y de escora, coincidentes a todos los rumbos.
- b) Para valores de escora ligeramente superiores,  $12^{\circ},5$ , se observan pequeños desvíos, iguales y del mismo signo, a los rumbos cuadrantales NE y SW, incrementándose ligeramente para valores mayores de “k+”, apareciendo en este último caso pequeños desvíos a los rumbos SE y NW.
- c) Para valores de escora de  $15^{\circ}$ , se empiezan a observar ligeros valores de desvíos a los rumbos cardinales y en todos los cuadrantales, siendo estos últimos mayores que los primeros.
- d) Para valores de escora de  $17^{\circ},5$ , los desvíos residuales aparecidos se comportan de manera similar al caso anterior, aunque ligeramente incrementados.
- e) Para valores de escora de  $20^{\circ}$ , los desvíos se incrementan a todos los rumbos, siendo notablemente mas acusados a los rumbos cuadrantales.
- f) En todos los casos, al alternar la banda de la escora, los desvíos son coincidentes en valor, aunque de signo contrario tal como corresponde. Solamente para valores de  $20^{\circ}$  se observan algunas pequeñas discordancias.

### B.– CONCLUSIONES RELATIVAS LOS VALORES TOLERABLES EN UNA BUENA COMPENSACIÓN

A la vista de los resultados obtenidos, se comprende la utilización de una tercera esfera para anular el desvío producido por el magnetismo accidental queda plenamente justificado para valores de escora inferiores a  $10^{\circ}$ .

En los mencionados resultados se ve cómo el ajuste de las esferas transversales vuelven a anular el desvío cuadrantal.

Para valores de escora superiores a  $10^\circ$ , los desvíos residuales observados son perfectamente asumibles, sobre todo si se tiene en cuenta la indudable aparición de toda clase de hierros asimétricos que resultarían de la posición de la aguja respecto a los hierros del buque.

#### C.– CONCLUSIONES RELATIVAS A LA METODOLOGIA EMPLEADA

El análisis efectuado pone de manifiesto la formidable herramienta que proporciona el desvioscopio para el desarrollo y aplicación de la teoría de la compensación de la aguja náutica, pudiéndose programar de una forma rigurosa la compensación de la misma a través de la determinación de los coeficientes exactos del desvío. El estudio de los elementos modificadores del campo magnético que sea necesario crear para el análisis de los casos que se deseen plantear, es fundamental para una correcta investigación.

## **2.– DIRECTRICES DE LAS FUTURAS INVESTIGACIONES**



## 2.1.– LINEA DE CONTINUIDAD FORMALMENTE ESTABLECIDA

Partiendo de las conclusiones previas y por aplicación de la metodología propuesta y contrastada, se ha comprobado la total idoneidad de los elementos constituyentes del desvioscopio para el planteamiento de mas líneas de investigación conducentes a la mejora de la compensación de la aguja náutica, pudiéndose componer otros modelos que traten de reflejar conductas acordes con un comportamiento real del fenómeno que se pretende analizar.

En la actualidad, el estudio asociado al comportamiento de la aguja cuando intervienen varillas asimétricas ofrece un amplio campo de Investigación. Así es posible analizar la influencia de la varilla “g”, despreciada por su teórica poca insignificancia, y determinar su participación real en el cálculo de los desvíos y su anulación

Sería posible canalizar las aportaciones en el mejor conocimiento del espectro variacional determinado por la colocación de la bitácora fuera del plano longitudinal, tal como sucede en la realidad con algunos tipos de buques.

Una continuación de esta faceta se puede poner en marcha a raíz de los resultados ofrecidos en la presente Tesis Doctoral. Se puede considerar la posibilidad de la existencia de una varilla “k-“ influyendo sobre la aguja, en cuyo caso, del análisis de la teoría expuesta en la presente Tesis, la tercera esfera estaría en el eje vertical, colocada encima de la aguja náutica.





**ABREVIATURAS**  
**CASTELLANO (MAYÚSCULAS)**

A	Coeficiente aproximado del desvío
A <sub>l</sub>	Coeficiente aproximado del desvío con el buque escorado
B	Coeficiente aproximado del desvío /Intensidad de campo magnético
Br	Babor/ Inducción remanente
C	Coeficiente aproximado del desvío
C <sub>l</sub>	Coeficiente aproximado del desvío con el buque escorado
D	Coeficiente aproximado del desvío
E	Coeficiente aproximado del desvío
E <sub>l</sub>	Coeficiente aproximado del desvío con el buque escorado
Er	Estribor
F	Fuerza
F <sub>E</sub>	Fuerza al Este
F <sub>N</sub>	Fuerza al Norte
H	Componente horizontal del magnetismo terrestre
H <sub>c</sub>	Fuerza coercitiva
I	Momento de inercia
K <sub>e</sub>	Constante electrostática fundamental
K <sub>m</sub>	Constante electrodinámica fundamental
J	Coeficiente
M	Momento magnético
Mr	Momento resistente
P	Imán longitudinal
Q	Imán transversal

R	Imán vertical
Ra	Rumbo de aguja
Rm	Rumbo magnético
T	Periodo
X	Componente longitudinal
Y	Componente transversal
Z	Componente vertical
X'	Componente longitudinal (magnetismo inducido)
Y'	Componente transversal (magnetismo inducido)
Z'	Componente vertical (magnetismo inducido)

#### **CASTELLANO (minúsculas)**

a	Varilla longitudinal en el eje longitudinal
b	Varilla transversal en el eje longitudinal
c	Varilla vertical en el eje longitudinal
d	Varilla longitudinal en el eje transversal
e	Varilla transversal en el eje transversal
f	Varilla vertical en el eje transversal
g	Varilla longitudinal en el eje vertical
h	Varilla transversal en el eje vertical
i	Escora
k	Varilla vertical en el eje vertical
l	Distancia
m	Intensidad de polo magnético
p	Intensidad de un polo magnético
r	Radio

### GRIEGO (MAYÚSCULAS)

$\Delta$	Desvío, en general.
$\Delta_a$	Desvío con el buque adrizado
$\Delta_e$	Desvío de escora
$\Delta_i$	Desvío con el buque escorado
$\Phi$	Flujo magnético
$\Sigma$	Sumatorio

### GRIEGO (minúsculas)

$\alpha$	Coefficiente exacto del desvío
$\alpha_1$	Coefficiente exacto del desvío con el buque escorado
$\beta$	Coefficiente exacto del desvío
$\gamma$	Coefficiente exacto del desvío
$\gamma_1$	Coefficiente exacto del desvío con el buque escorado
$\delta$	Coefficiente exacto del desvío
$\varepsilon$	Coefficiente exacto del desvío
$\varepsilon_1$	Coefficiente exacto del desvío con el buque escorado
$\theta$	Inclinación magnética
$\lambda$	Coefficiente de la fuerza directriz media
$\lambda_2$	Coefficiente de la fuerza directriz media (después de compensar)
$\mu$	Coefficiente de la fuerza vertical media
$\mu_2$	Coefficiente de la fuerza vertical media (después de compensar)
$\mu_0$	Permeabilidad absoluta del vacío





## ÍNDICE DE FIGURAS

II.1.- DEFINICIÓN DE FLUJO MAGNÉTICO	49
II.2.- MOMENTO DIRECTOR	52
II.3.- AGUJA NÁUTICA	54
II.4.- HACES 30° Y 45°	55
II.5.- POLO AISLADO EN LA PROLONGACIÓN DEL EJE	58
II.6.- POLO AISLADO EN LA PERPENDICULAR AL IMÁN	59
II.7. LINEAS DE FUERZA DEL CAMPO MAGNETICO TERRESTRE	62
II.8.- MOVIMIENTO SECULAR DEL POLO N. MAGNETICO	63
II.9.- COMPONENTES DEL MAGNETISMO TERRESTRE	64
II.10.- MODELO DE CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE	65
II.11.- CURVAS DE INDUCCIÓN Y FUERZA COERCITIVA	79
II.12.- MAGNETISMO PERMANENTE VERTICAL EN LA GRADA	80
II.14.- MAGNETISMO HORIZONTAL EN LA GRADA	81
II.14.- COMPONENTES DEL MAGNETISMO PERMANENTE	82
II.15.- SIGNO DEL MAGNETISMO PERMANENTE	83
II.16.- DESCOMPOSICIÓN DEL MAGNETISMO ACCIDENTAL	84
II.17.- SIGNOS DE LAS VARILLAS "a", "e" y "k".	85
II.18.- SIGNOS DE LAS VARILLAS "b", "c", "d", "f", "g" y "h".	85
II.19.- CAMPOS ACTUANTES SOBRE LA AGUJA	89
II.20.- PROYECCIÓN DE H	90
II.21.- FUERZA AL NORTE	91
II.22.- EXPRESIÓN GRÁFICA DEL DESVÍO	94
II.23.- DESVÍOS ANALÍTICO Y GRÁFICO DEL IMÁN P (+)	104

II.24.- DESVÍO ANALÍTICO Y GRÁFICO DEL IMÁN Q (+)	105
II.25.- DESVÍO ANALÍTICO Y GRÁFICO DEL IMÁN R (+)	106
II.26.- DESVÍO DE LA VARILLA “a” (-)	107
II.27.- DESVÍOS DE LA VARILLA “e” (-)	109
II.28.- ACCIÓN COMBINADA DE LAS VARILLAS “a” y “e”	110
II.29.- DESVÍO PRODUCIDO POR LA VARILLA “c (-)” H.N.	111
II.30.- DESVÍO ANALÍTICO Y GRÁFICO DE LA VARILLA “g”	113
II.31.- DESVÍO ANALÍTICO Y GRÁF. DE LA VARILLA “k (+)”, H.N.	114
II.32.- EFECTO DE UNA ESFERA HUECA	119
II.33.- COLOCACIÓN DE IMANES EN LA BITÁCORA	120
II.34.- DISPOSICIÓN DE LOS IMANES VERTICALES	121
II.35.- EFECTO SECUNDARIO DEL CORRECTOR DE ESCORA	122
II.36.- COLOCACIÓN DE LAS ESFERAS	123
II.37.- EFECTO SECUNDARIO DE LA BARRA FLINDERS	124
II.38.- EFECTO ADICIONAL DE LAS ESFERAS	125
III.1.- COMPONENTES DEL IMÁN Q CON LA ESCORA	136
III.2.- ACCIÓN DEL IMÁN R CON LA ESCORA	136
III.3.- FUERZAS INDUCTORAS	137
III.4.- ACCIÓN DE LA VARILLA “g”	138
III.5.- ACCIÓN DE LA VARILLA “e”	139
III.6.- ACCIÓN DE LA VARILLA “c”	139
III.7.- ACCIÓN DE LA VARILLA “k”	140
III.8.- PROYECCIÓN DE LAS NUEVAS FUERZAS	141
III.9.- DESVÍO CON EL BUQUE ESCORADO	144
III.10.- EFECTO DEL IMÁN VERTICAL	156

III.11.- DESVÍOS ALTERNATIVOS	157
IV.1.- VARILLAS CORRECTORAS DE LAS ESFERAS	164
IV.2.- DESVIOSCOPIO CON 3 ESFERAS	173
IV.3.- DESVIOSCOPIO	174
IV.4.- TRÍPODE Y VARILLA +k	185



## **BIBLIOGRAFÍA**





1. ACHUTEGUI, J. J.: *Apuntes de Compensación*,. Escuela Superior de la Marina Civil de Bilbao. Portugalete, 1.980
2. ACZEL, A.D. *The riddle of the Compass*. Harcourt Inc. N.Y., 2001
3. ANDERSON, E. W.: *The principles of navigation*. Hollis & Carter. London, 1979
4. ANON: *The Magnetic Compass, Principles, Selection, Navigation*. E.S. Ritchie & Son, Inc. Pembroke, MA. 1.988
5. APRAIZ, J. *Aceros especiales y otras aleaciones*. 5ª Edc. Editorial Dossat. Madrid, 1.975
6. ARANA, J.M.: *Teoría y Problemas de Compensación*. ESMC, La Coruña, 1977.
7. BABOR, J. ET AL: *Química General Moderna*” Edit. Labor. Madrid, 1965
8. BARTLETT, T. RYA *Book of navigation*. Adlard Coles Nautical. London, 1992
9. BLOXHAM, J., GUBBINS D., “La evolución del campo magnético terrestre”. *Investigación y Ciencia*, Abril 1995
10. BOWDICH, N. *American Practical Navigator*. Defense Mapping Agency Hydrographic/Topographic Center, 1.984
11. BOLE, A.G., DINELEY, W.O., NICHOLLS, C.E.: *The Navigation Control Manual*. Newnes. Londres, 1992.
12. BROWN, C.H.: *Deviation and the Deviascope*. Brown, Son & Ferguson, Ltd. Glasgow, 1928.
13. BURZALLI, GRILLO: *Manual del Oficial de Derrota*. Gustavo Gili. Barcelona, 1950
14. CAILLOU, M. et al.: *Traité de Navigation*. Masson, París, 1989
15. CAMPBELL, W. H.: *Introduction to geomagnetic fields*. Cambridge University Press, 1997
16. CAPASSO, I., FEDE, S.: *Navigazione*. Vols. II. Editore Ulrico Hoepli. Milán, 1981.
17. CARRIGAN, C. R. GUBBINS, D.: “Origen del Campo Magnético Terrestre”, *Investigación y Ciencia*, Abril 1979

18. COCKCROFT, A. N.: *Nichols's seamanship and nautical knowledge*. Brown, Son & Ferguson. Glasgow, 1983
19. COHAN, L.S. "Compass Deviation Affected by Lightning" *Ocean Navigator* N° 17 Enero/Febrero 1.988
20. COLLET A.: *Traite Theorique et pratique dela regulation et de la compensation des compas avec ou sans relevements*. August Challamel editeur 12e. edition Paris 1.902
21. CONCAS, V.M. "El Desvioscopio". *Revista General de Marina*. Tomo XXI, pgs. 189-191. Madrid, 1.987
22. COOLEN, E. J. et al.: *Nicholls's Concise Guide to the Navigation*. Vol. 1. Brown, Son & Ferguson. Glasgow, 1995.
23. CORBASÍ ORTÍN, A.: *Sistemas de navegación. Desde el compás magnético a la navegación por satélite*. McGraw-Hill. Madrid-Buenos Aires 1998
24. COSTA, J.B.: *Patrón de Yate*. Lerko Print S.A., 1993
25. COTTER, C.H.: *The Elements of Navigation and Nautical Astronomy*. Brown, Son & Ferguson Ltd. Glasgow, 1992.
26. CHACON F. *De los desvíos de la aguja náutica*. Madrid Deposito Hidrográfico 1.870
27. DEFENSE MAPPING AGENCY, HYDROGRAPHIC/TOPOGRAPHIC CENTER.: *Handbook of magnetic Compass adjustment* Fourth Edition Pub. No 226 Washington DC 1.980
28. DENNE, W.: *Magnetic Compass Deviation and Correction. A Manual of the Theory of the Deviations and Mechanical Correction of Magnetic Compasses in Ships*. Brown, Son & Ferguson. Glasgow, 1979.
29. EDMINISTER, M.: *Electromagnetismo*. McGraw-Hill, México, 1996
30. EVANS, F.J., ARCHIBALD SMITH: *Admiralty manual for deviations of the compas*. London Printer for her Majesty's Stationery Office 1.912
31. FLORA, FERDINANDO: *Astronomia Nautica (Navigazione Astronomica)*. Ulrico Hoepli Editore. Milano, 1987.

32. FOSSI GUTIÉRREZ, I.: *Tratado de Náutica*. Ed. Dossat, S.A. Madrid, 1961.
33. FROST, A.: *Principles and Practice of Navigation*. Brown, Son & Ferguson Ltd. Glasgow, 1988.
34. GARCÍA, J.M.: "Definite Compass Compensation on List Deviation by Introducing a Tirad Sphere". *1st. International Congress on Maritime Technological Innovations and Research*. Pgnas. 617-627. U.P.C. Barcelona, 1999.
35. GARCÍA PAREDES, J.G., BARBUDO, E.: *Navegación*. Ed. Fragata. Cádiz, 1951.
36. GARRIGA (Ed.): *Enciclopedia General del Mar*. Ediciones Garriga. Barcelona, 1982.
37. GAZTELU-ITURRI, R.: *Compensación de la aguja náutica*. Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco. Vitoria, 1999
38. GIRONA, R. et al.: *Compensación de la aguja náutica*. Departamento de Ciencias y Técnicas de la navegación, Universidad de La Laguna. 1994
39. GONZÁLEZ PINO, E. et al.: *Introducción a las Ciencias Náuticas, 1ª Parte* Publicaciones Técnico-Marítimas, Barcelona 1982.
40. GRANT, G. A., KLINKERT, J.: *The Ship's Compass*. Routledge & Kegan Paul. Londres, 1981.
41. HARBORD, J.B.: *Glossary of Navigation. A Vademecum for Practical Navigators*. 1977.
42. HAYLER, W.B.: *Merchant Marine Officer's Handbook*. Cornell Maritime Press. Centreville, 1989.
43. HEWITT, P.: *Conceptos de Física*. Ed. Limusa. México, 1995.
44. HINE, A. *Magnetic Compasses and Magnetometers*. Adam Hilger Ltd., London 1968
45. HINDERER, J et al.: "El Núcleo Terrestre". *Mundo Científico*, nº 116 Vol.11 pgnas. 870-872, 1992.
46. HOBBS, R.R. *Marine Navigation 1 Piloting*. 2<sup>nd</sup> Ed. Airlife Publishing Ltd. Shrewsbury. England 1.981



47. HMSO: *The theory of the deviations of the magnetic compass*. HM Stationery Office. London, 1948
48. HMSO: *Reports of the Liverpool Compass Committee to the Board of Trade*. HM Stationery Office. London, 1961
49. HMSO: *Merchant shipping navigational equipment. Instructions for the guidance of surveyors*. Maritime and Coastguard Agency, The Stationery Office. London, 1999
50. HOFFMAN, K.A. "Inversiones magnéticas y dinamo Terrestre". *Investigación y Ciencia*. Mayo, 1995
51. HURTADO, D.: "El enigma del campo magnético terrestre". *Ciencia Hoy*. Volumen 6, nº 33, 1996
52. IBÁÑEZ, I.: *Fundamentos de Navegación Marítima*. Servicio Editorial de la UPV, Vitoria, 2002.
53. JAMES, R. y PLANT, R.: *Study Guide to the Multiple-Choice Examinations Chief Mate and Master*. Centreville, 1987.
54. JERCHOW, E.: *From sextant to satellite navigation, 1.837-1.987, 150 Years*. C. Plath, Hamburg, Germany 1.987
55. KEMP & YOUNG: *Notes on Compass Work*. Stanford Maritime. Londres, 1979.
56. KLINKERT, J.: *Compass-Wise or Getting to Know your Compass*. Brown, Son and Ferguson, Ltd.. Glasgow, 1976.
57. KUCERA, G.F., SPENCER, N.S. : *Handbook of Magnetic Compass Adjustment*. Defense Mapping Agency Hydrographic and Topographic Centre. Washington, 1.980.
58. LANDSTREET, J., "Las estrellas magnéticas". *Mundo Científico*, Nº 37, Vol.4, 1997.
59. LASHERAS, J.: *Fundamentos de Navegación*. De. Icharopena. Zarauz, 1950.
60. LE CALVÉ, A.: *Cours de navigation á l'usage des candidats aux examens de la Marine Merchante et des plesanciers*. *Editions Maritimes et d'Outre-Mer*. vol. 3 , 5ª ed. Paris, 1976-1977

61. LERNER, R.: *Enciclopedia de la Física*. Alianza Editorial, 1987
62. LUND, C.A.: *Compasses in Small Craft*. Brown, Son and Ferguson, Ltd.. Glasgow, 1976.
63. LLEÓ, A.: *Física para Ingenieros*. Ediciones Mundi-Prensa. Madris, 2001.
64. LÓPEZ, G.M., FERNÁNDEZ, B.: *Estructura Del Buque*. Ed. Mena, Cadiz 1.972
65. LUCAS, A.: *Theorie Elementaire du Compas Gyroscopique a l'Usage Des Marins et des Aviateurs*. S.E.G.M.P. Paris, 1940.
66. LUND, C.A.: *Compasses in Small Craft*. Brown, Son & Ferguson Ltd. Glasgow, 1983.
67. MACILWAINE, W.S. *A Companion to Modern Navigation*. George Philip and Son Ltd. London, 1954
68. MALONEY, E.S.: *Dutton's Navigation & Piloting*. Naval Institute Press. Annapolis, 1985.
69. MARSHALL, S. et al: *Electromagnetismo, Conceptos y Aplicaciones, 4ª Edición*. Prentice-Hall Hispanoamericana S.A. México, 1996
70. MARTINEZ-HIDALGO, J.M.: *Historia y Leyenda de la Aguja Magnética*. Ed. Gustavo Gili, S.A. Barcelona, 1946.
71. MARTINEZ-HIDALGO, J.M.: *Magnetismo del Buque y Compensación de la Aguja Magnética*. Ed. Garriga, S.A. Barcelona, 1958.
72. MELCHIOR, P.: *The Physics of the Earth'*, Pergamon Pree, 1987
73. MERRIFIELD, F.G.: *Ship Magnetism and the Magnetic Compass*. Pergamon Press. Oxford, 1.963.
74. MIGUEL de L., L: *Geomagnetismo*. Instituto Geografico Nacional, 1980
75. MILDNER, F.: *Admiralty Compass Obsevatory. The Theory of the Desviations of the Magnetic Compass*. H.M. Stationery Office, London, 1.948
76. MINISTRY OF DEFENCE (NAVY): *Admiralty Manual of Navigation*. Vol. III. Her Majesty's Stationery Office. London, 1953.



77. MINISTRY OF DEFENSE (NAVY): *The Mariner's Handbook*. Hydrographic Department. Taunton, 1979.
78. MOLINS FERNÁNDEZ, A.: *Tratado de Compensación de la Aguja Magnética*. Ed. El Autor. Barcelona, 1959.
79. MOODY, A.B.: *Navigation Afloat. A Manual for the Seaman*. Hollis & Carter. London, 1980.
80. MOREU CURBERA, J., MARTÍNEZ JIMÉNEZ, E.: *Astronomía y Navegación*. Tomo III. Librería San José. Vigo, 1987.
81. MOREU CURBERA J., MARTINEZ JIMENEZ., E. *Manual de Navegación*. 5ª Edición Librería San Jose. Vigo, 1.971
82. NEWITT J.R., NIBLETT E.R.. *Canadian Journal of Earth Sciences*, Vol 23, 1.986 Pgs. 1062-1072.
83. NESS, N.F.: *A New Look at the Earth's Magnetic Field*. NASA, 1965
84. NICOLI, A.: *Navigazione tradizionale*. CEDAM Padova,. 1975
85. ORGANIZACIÓN MARÍTIMA INTERNACIONAL: *Survey of Navigational Aids and Equipment*. Curso Modelo OMI. Londres.
86. ORGANIZACIÓN MARÍTIMA INTERNACIONAL: *Normas de funcionamiento del equipo náutico*. OMI. Londres, 1988.
87. ORGANIZACIÓN MARÍTIMA INTERNACIONAL: *Resolución A.382 (X)*. 1977
88. REID, G. H.: *Practical guide to compass correction*. Waterline. Shrewsbury, 1998
89. RIBERA Y EGEA, J.L.: *Tratado de Navegación*. Artes Gráficas Grijelmo, S.A. Bilbao, 1961.
90. RIBERA Y URUBURU, L.: *Tratado de Navegación*. Artes Gráficas Grijelmo, S.A. Bilbao, 1945.
91. TALSON, R.: "North Magnetic Dip Pole". *Search and Rescue Society of British Columbia*. Vancouver, July 1997
92. SERWAY, R.: *Física, Tomo II, 4ª Ed*. McGrew-Hill, México, 1996

93. SIMPSON, A.: *Navigation guide volume 1. Near coastal navigation*. Brown, Son & Ferguson, Ltd. Glasgow, 1991
94. SHUTE, W. G.: *An Introduction to Navigation and Nautical Astronomy*. The McMillan Company. N.Y., 1944
95. SUBSECRETARÍA DE LA MARINA MERCANTE: *Apuntes de Astronomía Náutica y Navegación*. Madrid, 1972
96. SWIFT, A. J.: *Bridge team management: a practical guide*. The Nautical Institute. London, 1993
97. TERRY, A.: *El desvío de la aguja náutica*. Imprenta Fontanet, Madrid, 1875.
98. USNOO: "Handbook of magnetic compass adjustment". *HO Pub. No. 226. 3rd ed.*, *US Naval Oceanographic Office*, US Government Printing Office. Washington, 1994.
99. VALET J.P., CAERTILLOT, V.: "Las inversiones del campo magnético terrestre". *Mundo científico*, Vol. 12, nº. 129, Pp. 940/41, 1997.
100. VARIOS: *Apuntes de Astronomia y Navegación*. Subsecretaria de la Marina Mercante. Madrid, 1.978
101. WESTPHAL, W.H. *Tratado de Física*. Editorial Labor S.A. Barcelona, 1951
102. WOOD, H. M.: *The desviascope simplified*. James Brown & Son Ltd. Glasgow, 1922



## INTERNET

1. <http://www.mcga.gov.uk/publications/SITE/safetyofnavigation/annexes/Annex13.htm>
2. <http://www.mcga.gov.uk/publications/SITE/safetyofnavigation/annexes/Annex20.htm#5>
3. [http://www.caa.govt.nz/aircraft/compass\\_leaflet.htm](http://www.caa.govt.nz/aircraft/compass_leaflet.htm)
4. <http://29.1911encyclopedia.org/C/CO/COMPASS.htm>
5. <http://www.mcga.gov.uk/msn/msn1199.pdf>
6. <http://mac.uninav.it/museo/bussola.html>
7. <http://www.mcga.gov.uk/publications/SITE/safetyofnavigation/regulations/regulation17.htm#1>
8. <http://www.mcga.gov.uk/publications/SITE/safetyofnavigation/regulations/regulation19.htm#211>
9. <http://www.nima.mil/>
10. <http://www.mcga.gov.uk/publications/SITE/safetyofnavigation/regulations/regulation19.htm#211>
11. <http://www.practical-sailor.com/newspics/charts/892compass.pdf>
12. [http://www.bwsailing.com/PDFs/Compass\\_bws0699.pdf](http://www.bwsailing.com/PDFs/Compass_bws0699.pdf)
13. <http://www.navis.gr/marinar/comerror.htm>
14. <http://home.att.net/~agligani/navigation/magnetic.htm>
15. [http://www.colorado.edu/NROTC/NAVR\\_Classes/4030\\_-\\_Nav\\_I/NAVR4030-09.ppt](http://www.colorado.edu/NROTC/NAVR_Classes/4030_-_Nav_I/NAVR4030-09.ppt)
16. <http://prodevweb.prodev.usna.edu/SeaNav/NS100/Gyro%20and%20Magnetic%20Compass.pdf>
17. <http://www.navis.gr/nav aids/compass.htm>
18. <http://www.unm.edu/~nrotc/ns303/Less9.ppt>
19. <http://aa.usno.navy.mil/data/docs/AltAz.html>
20. <http://141.225.29.73/Navy3301/compass.ppt>
21. <http://www.tc.gc.ca/MarineSafety/Tp/TP2293/pdf/CHAPTER-24-Final.pdf>
22. <http://navsci.berkeley.edu/ns12A/LESSONS/J-Mag%20Compass.ppt>
23. <http://sarbc.org/north5b.html>
24. <http://www.vialatea.net/esperti/geo/geomagn.html>
25. <http://www.phys.univomal.it>

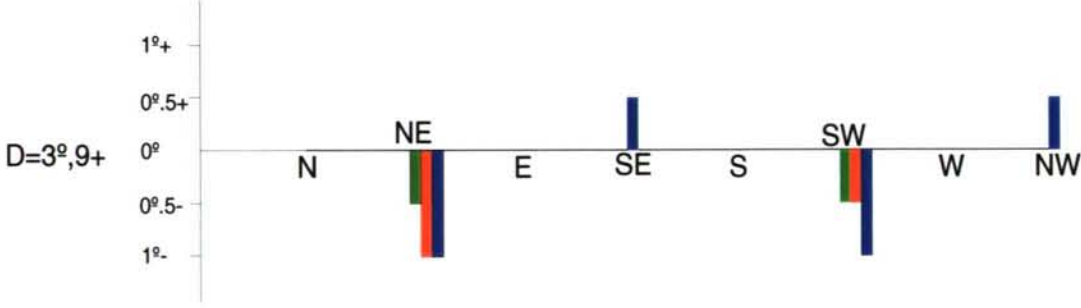
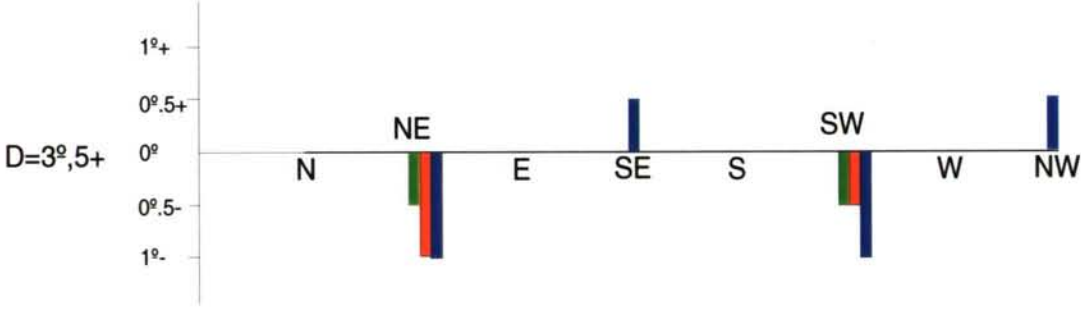
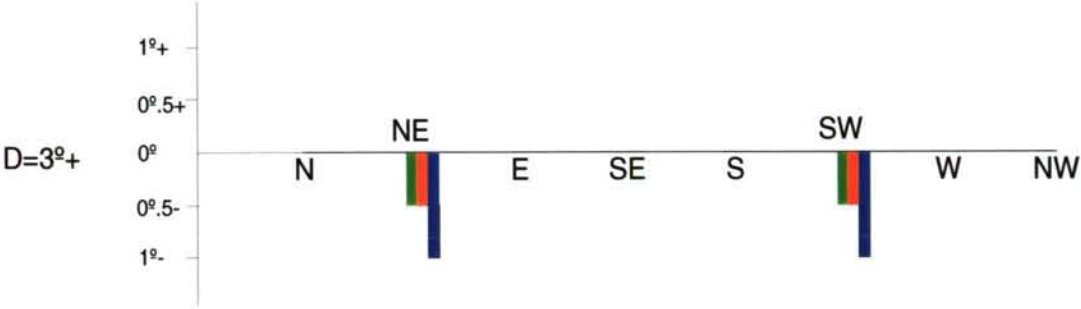
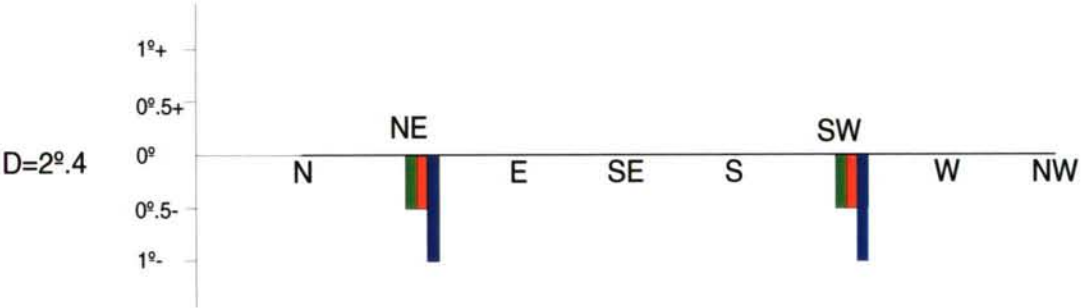
26. [http://.cam.org/-gouletc/dec\\_faq.html](http://.cam.org/-gouletc/dec_faq.html)
27. <http://www.info.org.ar/hoy33/campo01.htm>
28. <http://www.tgp.gob.pe/mag.htm>
29. <http://www.seguridad-mar.com/Enciclo/42Nav/42Inclinna/42Incclina.htm>

## **ANEXOS**





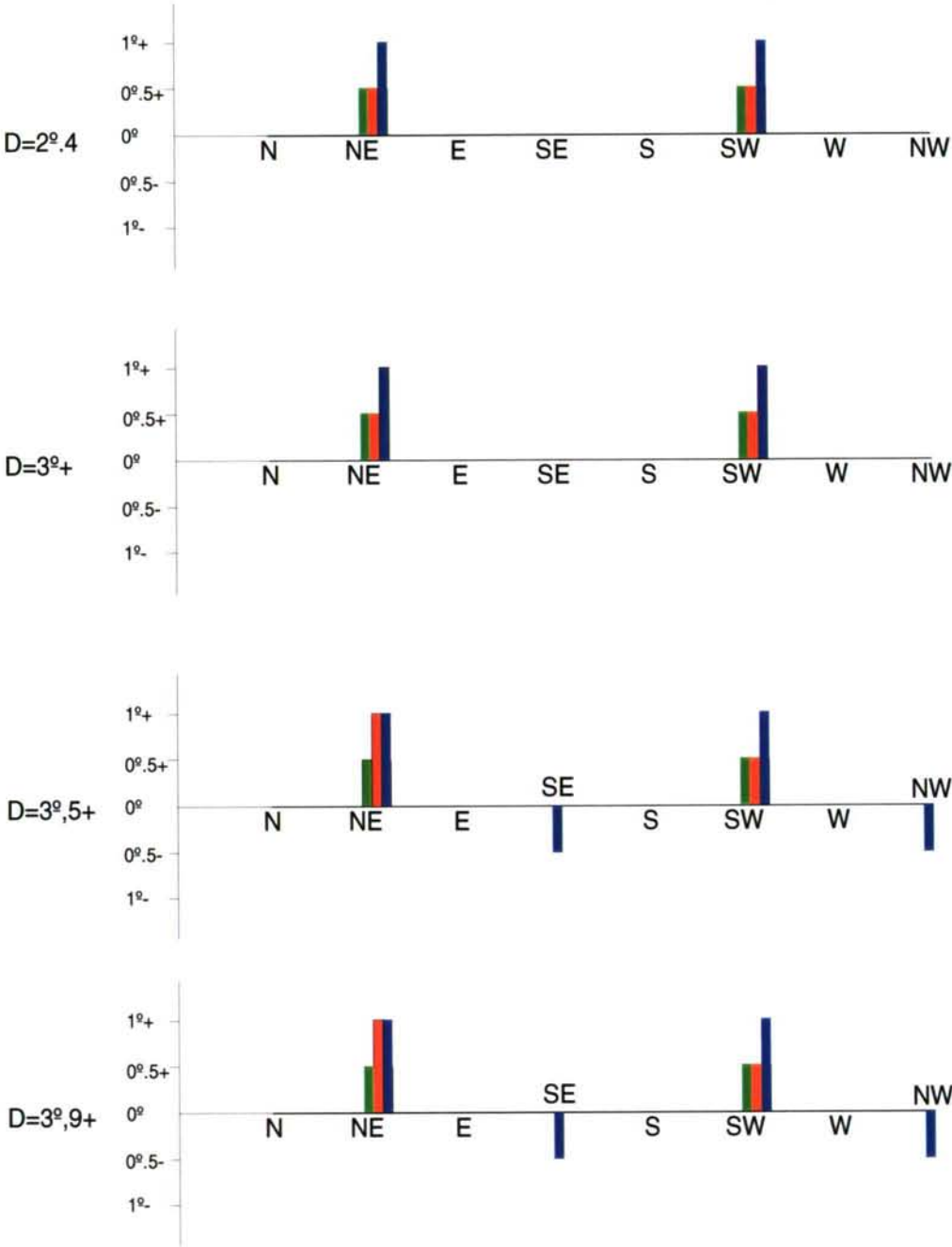
Desvíos para la condición de escora 12º.5 Br.



- Efecto de k+ a 20 cm.
- Efecto de k+ a 14 cm.
- Efecto de k+ a 11 cm.



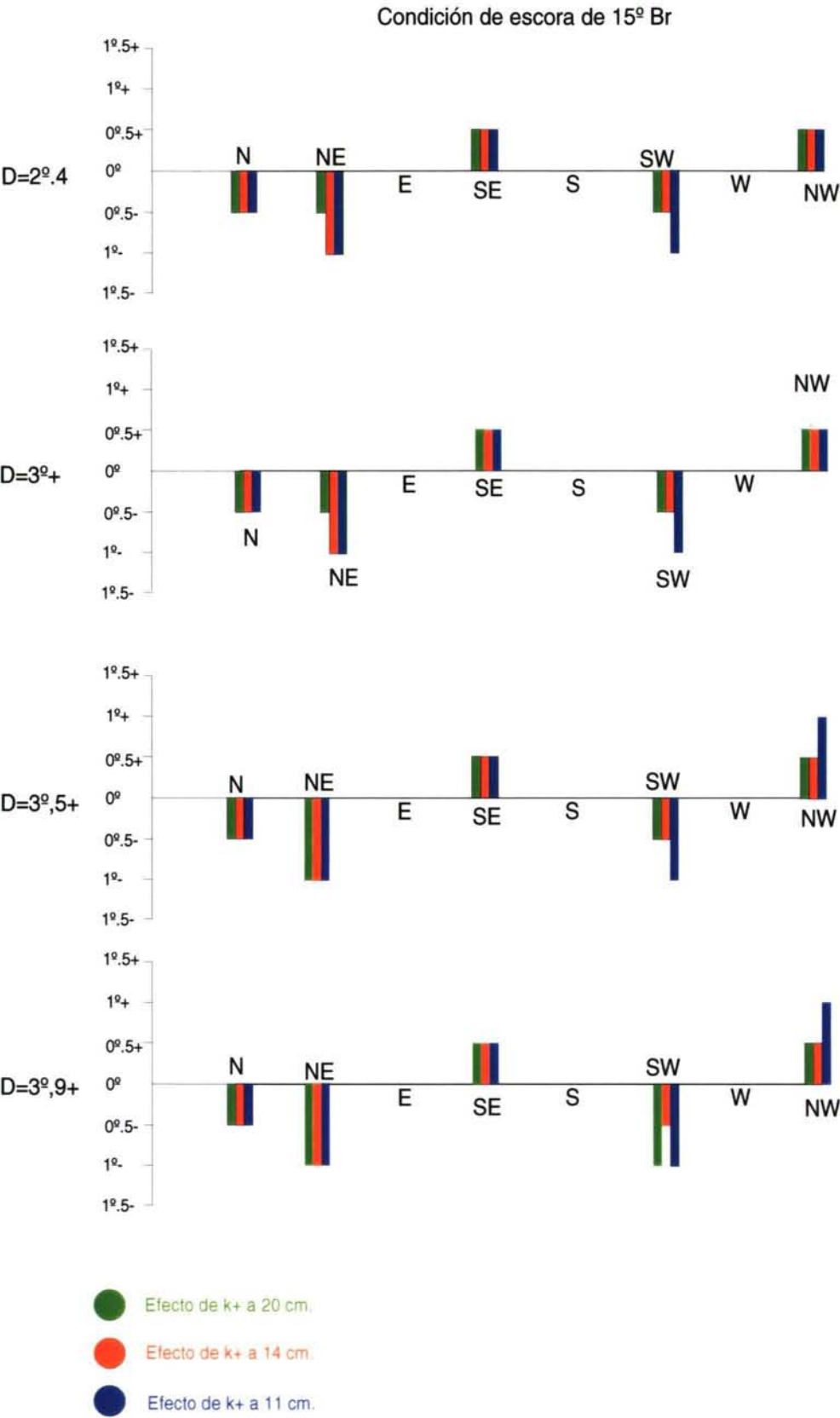
Desvíos para la condición de escora de 12º,5 Er



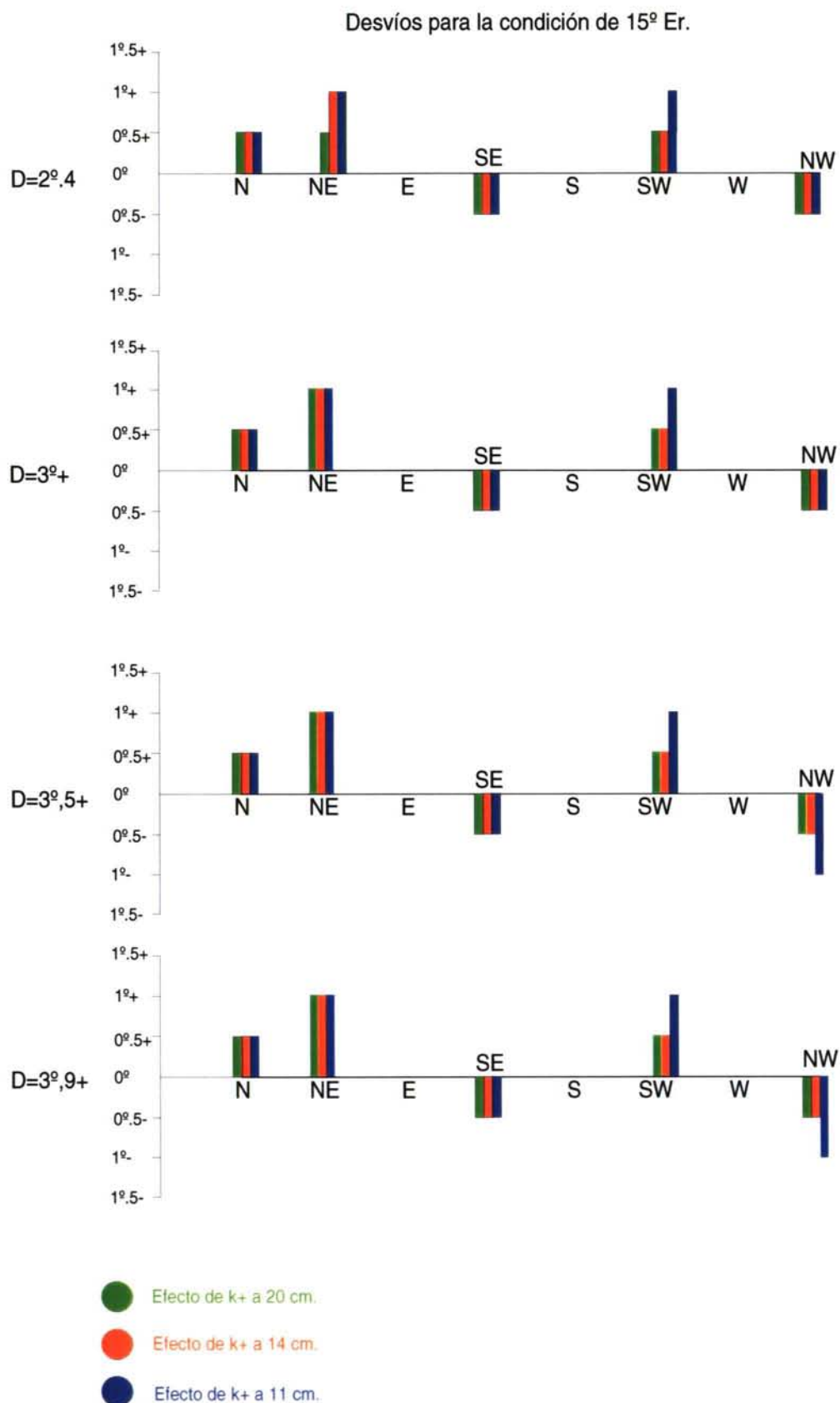
- Efecto de k+ a 20 cm.
- Efecto de k+ a 14 cm.
- Efecto de k+ a 11 cm.



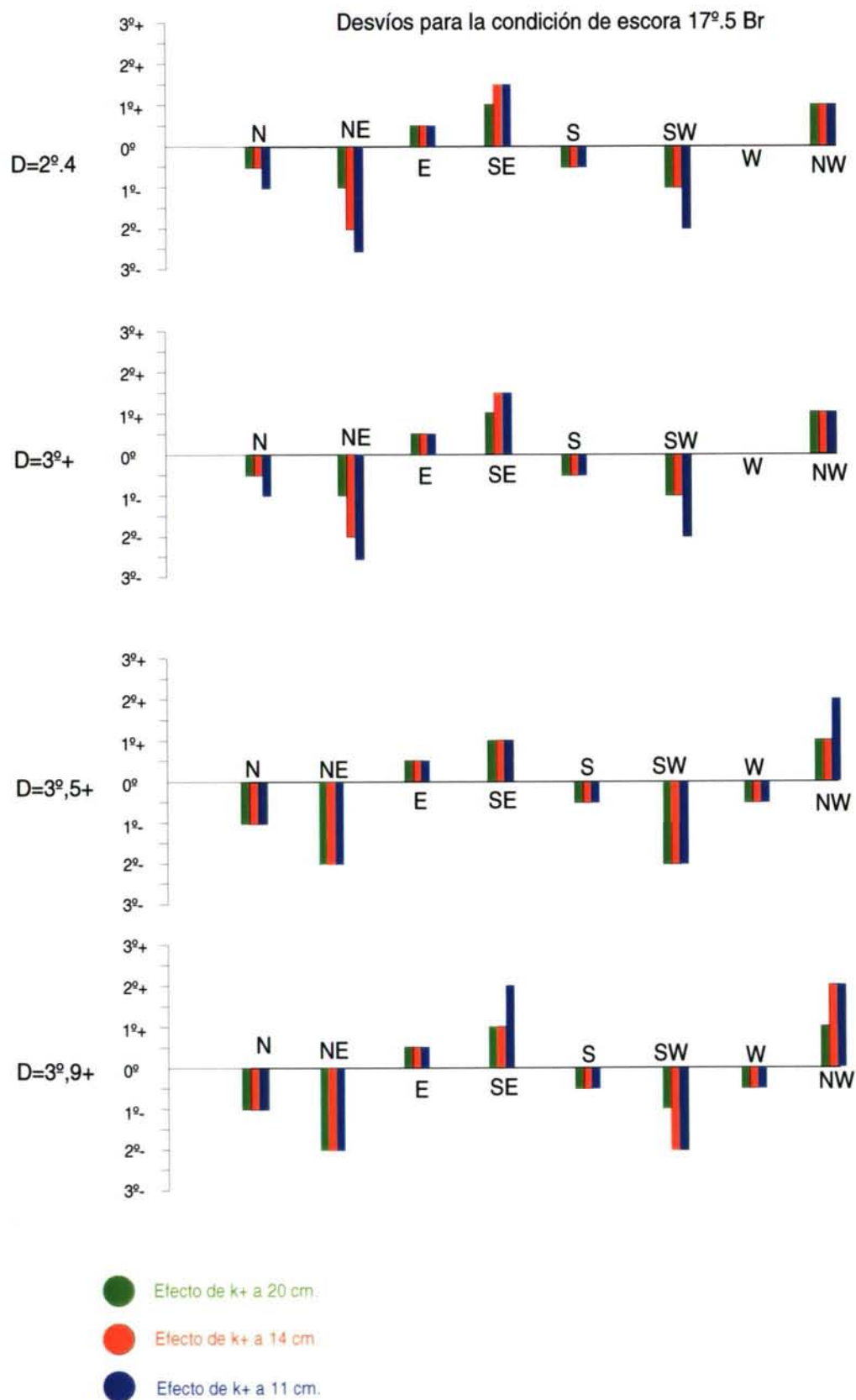






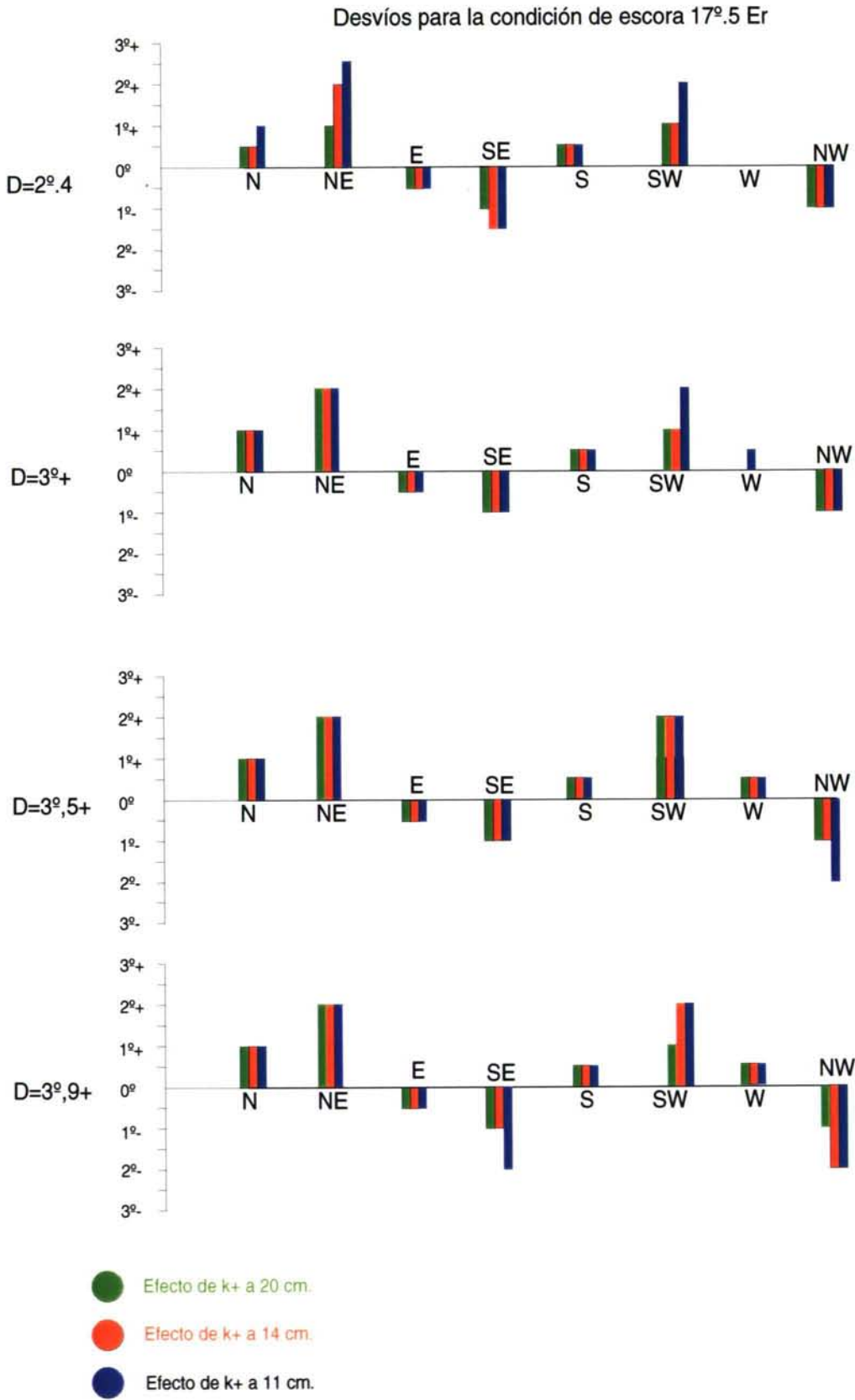






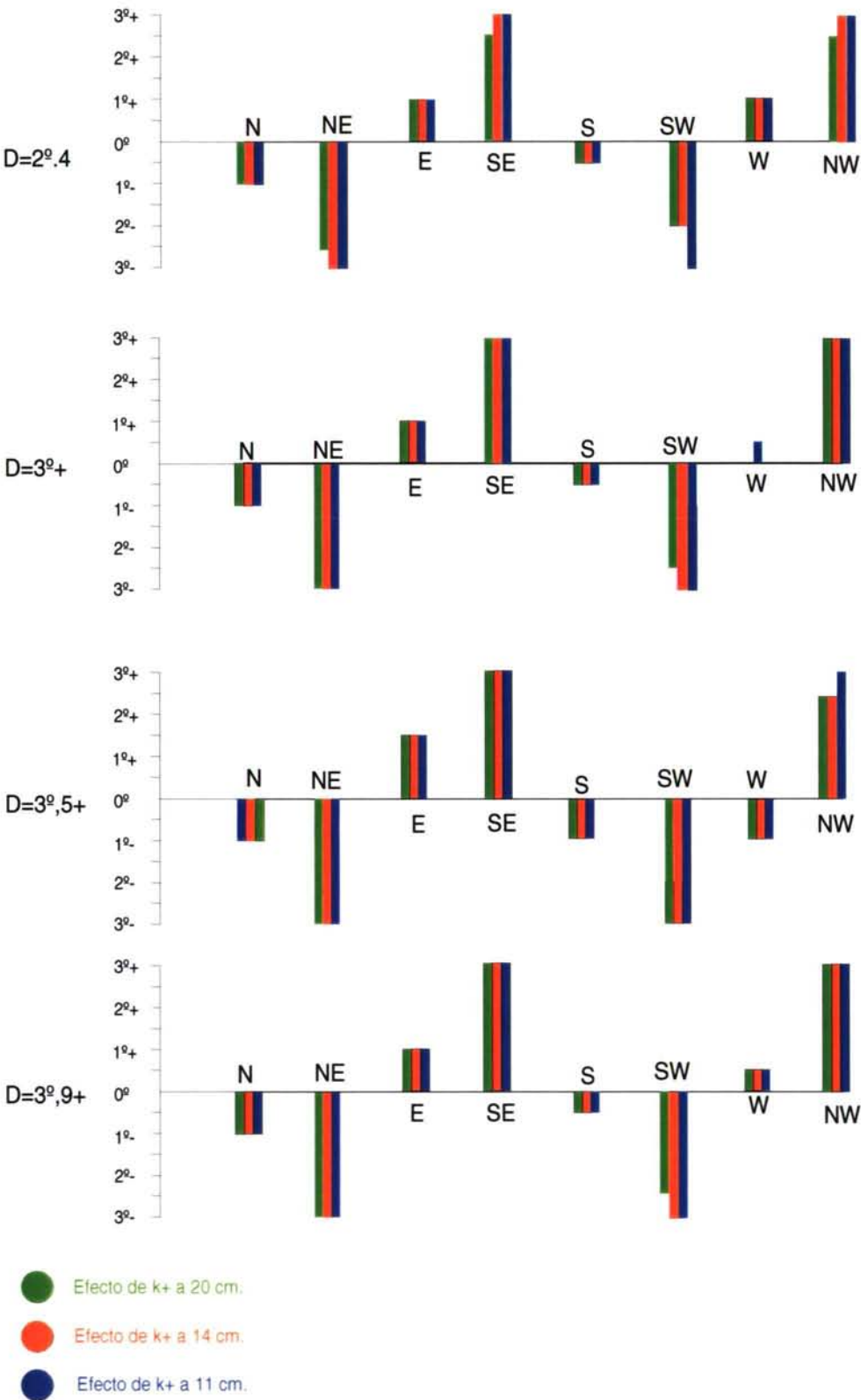






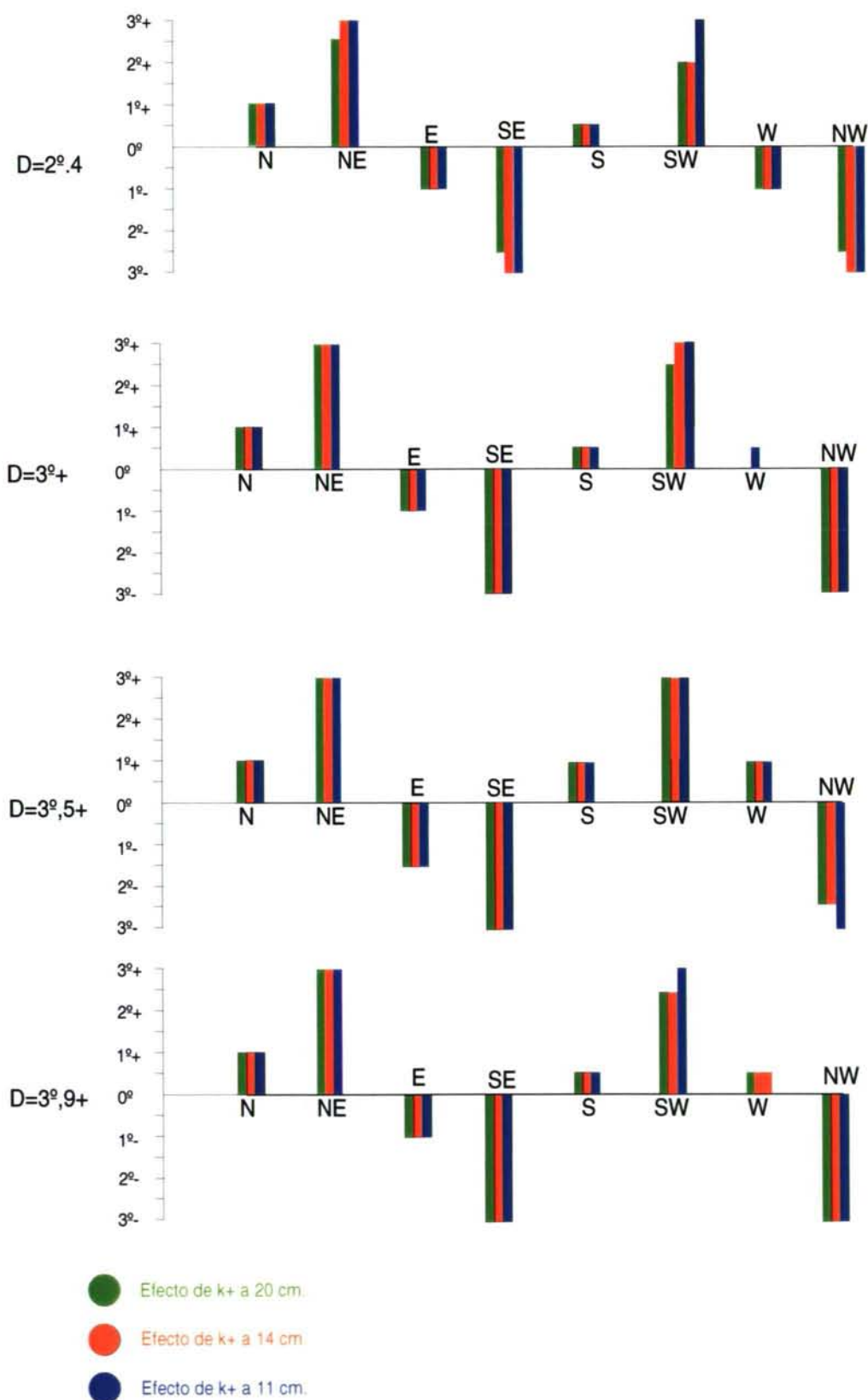


Desvíos para la condición de escora 20º Br





Desvíos para la condición de escora 20° Er







UNIVERSIDADE DA CORUÑA  
Servicio de Bibliotecas



1700744418